

Prohlášení

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 22 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.
- Мі́stopрісе́жне про́глашую, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně.

V Ostravě

.....
jméno a příjmení studenta

Poděkování

Mé díky patří vedoucímu diplomové práce Ing. Jaroslavu Beňovi, Ph.D za konstruktivní připomínky, odborný dohled a čas strávený při konzultacích. Dále bych chtěla poděkovat pracovníkům specializovaných pracovišť VŠB – TU Ostrava za vypracování expertních analýz, především paní Ing. Petře Bábkové za pořízení snímků na skenovacím elektronovém mikroskopu.

Anotace

Diplomová práce *Ovlivňování tepelně dilatačních charakteristik nekřemenných ostřiv* se zabývá hodnocením vlivu některých charakteristik ostřiv na tepelnou dilataci. V teoretické části práce je vypracována literární rešerše s popisem ostřiv, který zahrnuje základní vlastnosti ostřiv, výrobu, typické znaky a použití. Experimentální část se zabývá hodnocením fyzikálních a chemických charakteristik vybraných ostřiv, rozborem granulometrie, tvaru zrn a jejich vlivu na tepelnou dilataci. Cílem práce je potvrdit základní zákonitosti spojené s dilatací a na základě dosažených výsledků sestavit hybridní ostřivo s lineárnějším průběhem dilatace, než je u křemenných ostřiv, kde se strukturní změny (cristobalitická expanze) projevují diskontinuální dilatací.

Klíčová slova: křemenné ostřivo, nekřemenné ostřivo, dilatace, granulometrie, dilatometrie, vady z napětí, zálupy, výronky

Abstract

The diploma thesis *Influence of Thermal-Expansion Properties of No-Silica Sands* deals with the evaluation of the influence of chosen sands characteristics to the thermal expansion. The theoretical part provides the overview of sands features. The included analysis describes the basic characteristics of sands, theirs production, their typical signs and the application of sands. The experimental part is concerned with the evaluation of physical and chemical characteristics of selected sands, the granulometric analysis, the grain shape and the dilatometric analysis.

Key Words: silica sand, no-silica sand, thermal expansion, granulometric analysis, dilatometric analysis thermal stress defects, scabs, veins.

1. ÚVOD	5
2. CÍL PRÁCE	6
3. TEORETICKÁ ČÁST.....	7
3.1. OSTŘIVA	7
3.1.1. <i>Křemenné ostřivo</i>	8
3.1.2. <i>Olivín</i>	11
3.1.3. <i>Dunit (Magnolite)</i>	12
3.1.4. <i>Chromit</i>	13
3.1.5. <i>Zirkon</i>	14
3.1.6. <i>Magnezit</i>	14
3.1.7. <i>Šamotový lupek</i>	16
3.1.8. <i>Korund</i>	17
3.1.9. <i>Staurolit</i>	18
3.1.10. <i>Cerabeads</i>	18
3.1.11. <i>Kerphalite KF</i>	19
3.1.12. <i>Bauxit-sand</i>	19
3.1.13. <i>Orthosilicate [30]</i>	20
3.2. VADY Z NAPĚTÍ.....	21
3.2.1. <i>Zálupy</i>	21
3.2.2. <i>Výronky</i>	23
3.3. TEPELNÁ DILATACE OSTŘIV	24
3.3.1. <i>Tvar zrn</i>	24
3.3.2. <i>Granulometrie</i>	25
3.3.3. <i>Tepelná dilatace různých druhů ostřiv</i>	27
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	30
4.1. POUŽITÉ SUROVINY	30
4.1.1. <i>Šajdikove Humence (ŠH 35)</i>	30
4.1.2. <i>Grudzeň Las</i>	30
4.1.3. <i>Provodín</i>	30
4.1.4. <i>Olivín</i>	31
4.1.5. <i>Dunit</i>	31
4.1.6. <i>Šamotový lupek</i>	31
4.1.7. <i>Kerphalite</i>	31
4.1.8. <i>Chromit</i>	31
4.1.9. <i>Specialsand CKL 450</i>	31
4.2. METODIKA MĚŘENÍ.....	32
4.2.1. <i>Granulometrický rozbor</i>	32
4.2.2. <i>Hodnocení hranatosti (SPHT)</i>	32
4.2.5. <i>Stanovení pH vodního výluhu</i>	33
4.2.6. <i>Ztráty žiháním</i>	33
4.2.7. <i>Hodnocení tvaru zrn a chemické složení</i>	33
4.2.8. <i>Měření tepelné dilatace</i>	33
4.3. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	34
4.3.1. <i>Granulometrický rozbor ostřiva ŠH 35 (sítový rozbor)</i>	35
4.3.2. <i>Hodnocení tvaru zrn a EDX analýzy</i>	37
4.3.3. <i>Hodnocení tepelné dilatace</i>	47
4.3.4. <i>Hybridní ostřiva</i>	52
4.3.5. <i>Porovnání dilatace měřených ostřiv</i>	55
4.3.6. <i>Koeficient tepelné expanze</i>	56
5. DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	57
6. ZÁVĚR	58
7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	59
8. SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	62
9. SEZNAM PŘÍLOH	64

1. Úvod

Křemenná ostřiva jsou ve slévárenství nejpoužívanějšími ostřivy. V roce 2008 bylo v České republice evidováno 24 ložisek křemenných písků vhodných pro použití ve slévárenství, přičemž z 10ti z nich se v současné době těží [1]. Tento fakt činí křemenná ostřiva nejdostupnějšími především z důvodů ekonomických (dovoz není nákladný). Přes svou všestrannost mají křemenná ostřiva i své nevýhody. Mezi ně patří především neplynulá tepelná dilatace, kterou způsobují polymorfní přeměny křemene, cristobalitická expanze a zvýšená reaktivnost za vysokých teplot. Křemenný prach navíc může způsobovat vznik plicního onemocnění - silikózy.

Z výše uvedených důvodů se vedle křemenných ostřiv ve slévárenství používají i ostřiva nekřemenná, která mají nižší reaktivitu v žáru (než křemenné ostřivo), některá mají vyšší žáruvzdornost a vyšší ochlazovací účinek. Jejich použití také vede k odstranění vad odlitků způsobených tepelnou dilatací křemenného písku, jako jsou trhliny, výronky, penetrace a zálupy [2].

Mezi prvními používanými nekřemennými ostřivy byl šamotový lupek (pojený kaolinitickým jílem - šamotové směsi). Používal se tam, kde křemenné ostřivo nevyhovovalo kvůli své tepelné dilataci a omezené žáruvzdornosti. Následně se pro svou tepelnou stálost rozšířila magnezitová, chrommagnezitová ostřiva, a přírodní ostřiva, jako je chromit, zirkon, olivín a dunit [3]. V poslední době se vyvíjejí nová syntetická ostřiva, u kterých při kombinaci s křemenným pískem nedochází k odměšování na základě rozdílných sypných hmotností, které komplikuje mísení i vstřelování směsi při výrobě jader. Výsledkem jsou syntetická ostřiva se sypnou hmotností velmi blízkou sypné hmotnosti křemenného ostřiva [2].

2. Cíl práce

Diplomová práce se zabývá ovlivňováním dilatace ostřiv. Cílem bylo hodnotit vlivy, jako např. velikost a tvar zrna, na výslednou dilataci. Pro posuzování těchto kritérií byla vybrána křemenná ostřiva, u nichž je proces dilatace velmi dobře popsán a ověřen, a která nabízejí jak zrna kulatá (Šajdíkové Humence, Grudzeń Las), tak i zrna hranatá (Provodín).

V další fázi byla měřena dilatace nekřemenných ostřiv, porovnání výsledných hodnot s údaji získanými z literatury a s naměřenými hodnotami dilatace křemenných ostřiv. Při výběru nekřemenných ostřiv pro dilatometrickou analýzu, byla zohledněna především možnost jejich kombinace s křemennými ostřivy a ekonomická dostupnost. Z tohoto vyplývá vytyčení dalšího cíle práce, jímž bylo, ze získaných hodnot a závislostí, sestavit hybridní ostřivo vhodné pro použití v podmínkách českých sléváren, které by poskytovalo lineárnější průběh tepelné dilatace, než má samostatné křemenné ostřivo.

3. Teoretická část

3.1. Ostřiva

Ostřivo je hlavní hmotnostní složkou formovací směsi, tvoří 80 – 98% směsi. Ostřivo rozhodujícím způsobem ovlivňuje fyzikální vlastnosti forem a jader, především tepelnou akumulaci, tepelnou vodivost, dilataci směsi i vznikající napětí. Určuje i technologické vlastnosti směsi, jako je spěchovatelnost, vaznost, pevnost, pórovitost, prodyšnost a další [4].

Je to zrnitý žáruvzdorný, neplastický materiál s velikostí zrn nad 0,02 mm (menší částice jsou označovány jako vyplavitelný podíl). Vlastnosti ostřiva jsou dané chemickým a mineralogickým složením, granulometrickou skladbou a hranatostí [5] [6].

Podle chemické povahy se ostřiva dělí na:

- kyselé - křemenné písky;
- neutrální - šamot, olivín, korund;
- zásaditá - magnezit [6].

Podle původu vzniku lze ostřiva rozdělit:

- přírodní ostřiva - křemenné písky, olivín;
- upravené písky - prané křemenné písky;
- speciální ostřiva: 1. syntetická ostřiva:

- a) kalcinovaná - bauxit;
- b) slinutá - mullit;
- c) spékaná - orthosilicate;

- 2. drcená ostřiva - magnezit;
- 3. kovová ostřiva;
- 4. hybridní ostřiva (směs přírodních, syntetických a kovových ostřiv) [7].

3.1.1. Křemenné ostřivo

Křemenný písek (*Obr. 1*) je jedním z nejrozšířenějších ostřiv. Základní složkou je oxid křemičitý ($\text{SiO}_2 > 96\%$), který je v přírodě nejhojněji zastoupeným minerálem, dále obsahuje oxidy a uhličitany [6] [8]. Krystalizuje v soustavě trigonálně trapezoedrické, tvrdost má 7 Mohsovy stupnice, měrná hmotnost se pohybuje v mezích $2620 - 2660 \text{ kg/m}^3$ [6]. Sypná hmotnost je $1500 - 1600 \text{ kg/m}^3$ [8].



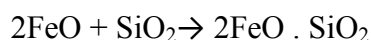
Obr. 1 Zrna křemenného ostřiva [9]

Křemenné písky vznikají zvětráváním a rozpadem žuly. Žula se rozpadá na živce, slídy a křemen. Z křemene vzniká reakcí s vodou či vzduchem SiO_2 . Písky s obsahem jílu (kaolinitu) do 2% vznikají sedimentací v pouštních dunách, řekách a mořích. Tyto písky jsou vhodné pro slévárenské účely. Písky s vysokým obsahem jílu (glaukonit, illit) se ve slévárnictví používají méně (z důvodu většího přídatku vody následuje nutnost sušení forem) [10].

Teplota tání kolem 1700°C umožňuje výrobu forem a jader k odlévání většiny slévárenských slitin. Teplotu tání výrazně snižují prvky (alkálie), jako je vápník, sodík, draslík, železo a některé živce.

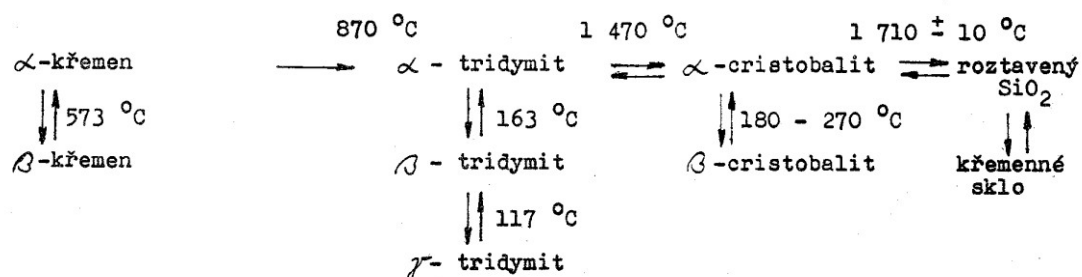
Nevýhodou křemenného ostřiva je, že při ohřevu prodělává polymorfní přeměny, které se projevují objemovými změnami a poruchami celistvosti formy. Další nevýhodou je reaktivnost se zásaditými látkami [5]. Tyto reakce jsou příčinou snížené žáruvzdornosti. Problém z hygienického hlediska představuje křemenný prach, který vyvolává silikózu plic [6].

Křemenné ostřivo je kyselá sloučenina a reaguje se zásaditými látkami za vzniku sloučenin o snížené žáruvzdornosti. Např. reakcí SiO_2 s FeO se tvoří fayalit [6]:



Fayalit je kvůli svému nízkému bodu tání ($1185 - 1205^\circ\text{C}$) dáván do souvislosti s penetrací kovu do formy a vznikem připečenin. Pokud se reakce zúčastní MnO (například z legovaných ocelí), teplota tavení se dále snižuje. Proto je všeobecnou snahou u legovaných ocelí používat ostřiva bazická s vyšší žáruvzdorností.

Oxid křemičitý může existovat v několika krystalických a jedné amorfní modifikaci (*Obr. 2*).

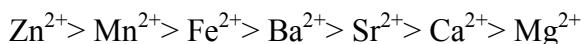


Obr. 2 Modifikační změny SiO_2 [8]

Při normální teplotě je stálý $\beta(\text{SiO}_2)$, při 573°C se přeměňuje na $\alpha(\text{SiO}_2)$. Měrná hmotnost se mění jen nepatrně ($\rho(\beta\text{-SiO}_2)=2650\text{ kg/m}^3$, $\rho(\alpha\text{-SiO}_2)=2630\text{ kg/m}^3$). Přeměna probíhá během několika sekund. Krystalická mřížka se změní z trigonálně trapezodrické na hexagonální. Lineární změny směsi jsou podle druhu křemenného písku +0,86 až +1,3%, (t.j. cca 2,58 až 3,9%-ní zvětšení objemu).

Modifikace $\alpha(\text{SiO}_2)$ je stálá v rozmezí teplot $573^\circ\text{C} - 870^\circ\text{C}$. Za přítomnosti mineralizátoru (např. wolframanu sodného) se při 870°C $\alpha(\text{SiO}_2)$ přeměňuje v α - tridymit. Tato modifikace je stálá při teplotách $870^\circ\text{C} - 1470^\circ\text{C}$. Při chladnutí se přeměňuje na β – tridymit a následně na γ – tridymit [8].

Při 1470°C se α - tridymit, za přítomnosti mineralizátorů, přeměňuje na α - cristobalit, který je stálý do 1713°C , pak se přeměňuje v křemenné sklo. Při změně na α - cristobalit dochází k podstatným změnám v krystalové mřížce (hexagonální \rightarrow krychlová). Rychlost změny závisí na jakosti křemene a přítomnosti katalyzátorů. Proces, který je doprovázen růstem až o 15,7 obj. %, probíhá velmi pomalu, pokud je křemen chemicky čistý, hrubě krystalický, s málo defektní mřížkou. Přeměna je katalyzována přítomností kationtů (Na - z vodního skla, K - z resolů apod.). Cristobalitizace je značně urychlována kationty podle následujících řad:



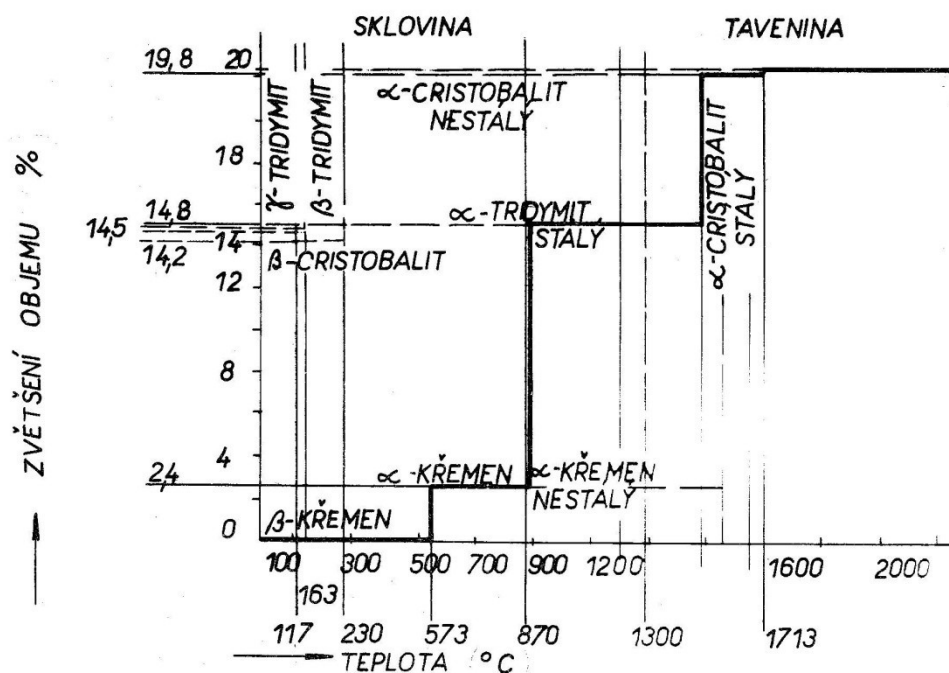
Vedle katalyzátorů má na rychlost přeměny vliv i zrnitost křemenného písku. Jsou-li zrna malá, probíhá cristobalitizace velmi rychle. U hrubších zrn na povrchu nejdříve vznikají zárodky cristobalitu, poté cristobalitizace probíhá do hloubky.

Důsledkem cristobalitické expanze je, že při vyšším tepelném namáhání forem a hlavně jader, vyrobených z čistých křemenných ostřiv za přítomnosti mineralizátorů, nelze zaručit rozměrovou i tvarovou přesnost odlitků. Cristobalitická expanze také hraje důležitou úlohu v mechanismu tvorby připečenin, hlavně u ocelových odlitků, kde

expandující jádro trhá vrstvu povrchové ochrany. U jader s nižším tepelným namáháním, tj. tam, kde nedochází k periodickému natuhávání, se cristobalitická expanze projevuje růstem zbytkového napětí. Napětí nepříznivě ovlivňuje rozpadavost a čistitelnost pravých jader. Cristobalit je stále více dáván do souvislosti se vznikem silikosy, protože je biologicky velmi aktivní modifikací $\alpha(\text{SiO}_2)$ [6] [8].

Podle Jelínka [6] určité řešení k ovládnání cristobalitické expanze přináší použití přísad typu $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ a Fe_2O_3 , které ovlivňují viskozitu křemičitanových skel (binární typ $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$), především na ternární skla (typ $\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$), přísadou bauxitu, jílu, oxidů Fe apod., a tak zvyšují teplotu počátku cristobalitické expanze za hranici teplot slévárenské formy nebo jádra [6].

Křemenné ostřívo má diskontinuální tepelnou dilataci (Obr. 3). Celková dilatace křemenného ostřiva je podstatně vyšší, než dilatace jiných druhů ostřiv.



Obr. 3 Dilatace a fázové přeměny SiO_2 [6]

3.1.2. Olivín

Olivín (*Obr. 4*) používaný jako slévárenské ostřivo je minerál sopečného původu s vysokým obsahem hořčíku. Skládá se převážně z tuhého roztoku dvou křemičitanů – forsteritu Mg_2SiO_4 (93%, bod tání $1900\text{ }^\circ\text{C}$) a fayalitu Fe_2SiO_4 (6%, bod tání $1205\text{ }^\circ\text{C}$), dále ho doprovází minerály jako je chromit, spinel, magnetit a serpentin. Nejbohatším nalezištěm v Evropě je Åaheim v Norsku [6]. Vytěžený olivín se dále zpracovává drcením, mletím, tříděním na požadovanou zrnitost. Pro slévárenské účely se ještě plaví a suší.



Obr. 4 Olivínové ostřivo

Je neutrální až slabě zásadité povahy (pH 8,9 – 9,5) [11], zelené barvy, měrná hmotnost $3200 - 3600\text{ kg/m}^3$, sypaná hmotnost 1850 kg/m^3 [12], tvrdost 6,5 – 7,0 Mohsovy stupnice tvrdosti [5]. Teplota tavení okolo $1870\text{ }^\circ\text{C}$ (v závislosti na poměru forsterit/fayalit). V přítomnosti křemenného písku se teplota tavení snižuje a počátek slinování pak nastává okolo $1410\text{ }^\circ\text{C}$. Výhodou olivínového ostřiva je téměř lineární tepelná dilatace, nižší než u SiO_2 . Při $1000\text{ }^\circ\text{C}$ dosahuje hodnoty okolo 1,3%. Olivínové ostřivo se vyznačuje zrny se zaoblenými hranami a hladkým povrchem [3].

Má vyšší vývin plynů a par než křemenné ostřivo, což je způsobeno tepelným rozkladem sekundárních minerálů. Může mít tak vyšší sklon k bublinatosti odlitků.

Olivín lze použít do formovacích směsí se všemi běžně používanými pojivy. Nejčastěji se používá pro směsi pojené jíly, vodním sklem (CO_2 -proces, samovolně tuhnoucí směsí sypké i zpěněné) i oleji a cementem.

Teplená akumulace a chemická stálost je vyšší, než u křemenného ostřiva. Díky pevné fixaci SiO_2 ve struktuře fayalitu a forsteritu způsobuje zásaditou reakci za vysokých teplot a pak nereaguje s MnO a dalšími zásaditými oxidy. Je proto vhodným ostřivem pro přípravu směsí k lití legovaných ocelí, kde může nahradit magnezit a chrommagnezit [6] [13].

Olivínové ostřivo není, oproti křemennému, považováno za zdravotní riziko s ohledem na možnou silikózu plic [14].

3.1.3. Dunit (Magnolite)

Dunit (*Obr. 5*) je ultrabazická vyvřelá hornina nazvaná podle Dun Mountains na Novém Zélandě. Je mineralogicky podobný olivínu - tuhý roztok forsteritu Mg_2SiO_4 (93%) a fayalitu Fe_2SiO_4 (6%), dále obsahuje doprovodné minerály jako serpentín, chromit, spinel a magnetit. Proti olivínu obsahuje CaO a Fe_2O_3 , zatímco obsah Al_2O_3 je v olivínu asi 10x vyšší [3].



Obr. 5 Dunitové ostřívo

Speciální slévárenské ostřívo se připravuje sintrováním dunitu v rotačních pecích při teplotách 1500 – 1600 °C [6]. Materiál je následně upravován drcením, mletím, slinováním a odprášením podle požadované zrnitosti ostřiva. Oproti přírodní surovině získáváme produkt s menší chemickou aktivitou [3]. Chemické složení dunitového ostřiva je následující: 48%MgO, <42% SiO_2 , <10,5% Fe_2O_3 , >1% Al_2O_3 , >0,4%CaO [15].

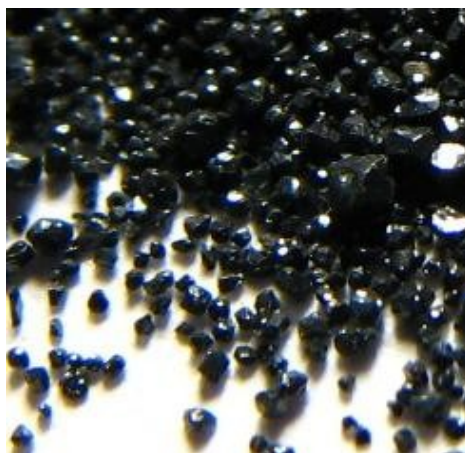
Měrná hmotnost ostřiva je 3100kg/m³, sypná hmotnost 1450 kg/m³, teplota tání okolo 1380°C, lineární roztažnost při 1000 °C je 0,6% [12], ztráta žháním maximálně 0,2%, prachové podíly 1,5 – 2,5% [3].

Zrna ostřiva se vyznačují nepravidelným tvarem a drsným porézním povrchem, což způsobuje vyšší spotřebu pojiva. Díky nižší hodnotě tepelné akumulace formy (b_f) vykazuje, oproti chromitu a chrommagnezitu, nižší výskyt připečenin, trhlin a zavalenin [12].

Má zásadité pH (7 – 8), proto do forem s dunitovým ostřivem lze odlévat Mn oceli, legované zásadité oceli i jakostní litiny. Dunitové ostřívo lze kombinovat se všemi typy slévárenských pojiv kromě kysele vytvrzovaných fenolických a furanových pryskyřic, kde reaguje s kyselým tvrdidlem rychleji než pryskyřice a nemůže dojít k dostatečnému vytvrzení směsi. Obvyklými pojivy jsou hlavně vodní sklo (CO_2 -proces), v menším rozsahu alkydové pryskyřice, bentonit a škrobová pojiva [3] [6].

3.1.4. Chromit

Chromitové ostřivo (*Obr. 6*) se získává těžbou chromitové rudy. Nejdůležitějším nalezištěm chromitu je Jihoafrická republika. Po těžbě následuje třídění podle zrnitosti a odprašování [16]. Chromit je tuhý roztok ferochromitu $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, picrochromitu $\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, spinelu $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, hercynitu $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ a magnesioferitu $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ [6].



Obr. 6 Chromitové ostřivo

Podle obsahu chromu jsou chromity členěny na chromity s vysokým obsahem Cr, tzv.

chromity chemické a chromity s nízkým obsahem Cr, ale s vyšším obsahem Al, tzv. chromity keramické. Keramické (metalurgické) chromity jsou využívány pro slévárenské účely. Ostřivo by mělo obsahovat minimálně 45 – 48% Cr_2O_3 a max. 12% Fe. Pro zabránění vzniku nízkotavitelných sloučenin je věnována pozornost obsahu SiO_2 a to ve formě volného křemene nebo silikátů. Pro masivní ocelové odlitky by celkový obsah SiO_2 neměl přesáhnout 2 – 2,5% [6]. Chemické složení může být následující: $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 46\%$, Fe_2O_3 28%, Al_2O_3 16%, MgO 11%, $\text{SiO}_2 < 2,5\%$, CaO 0,2% [2].

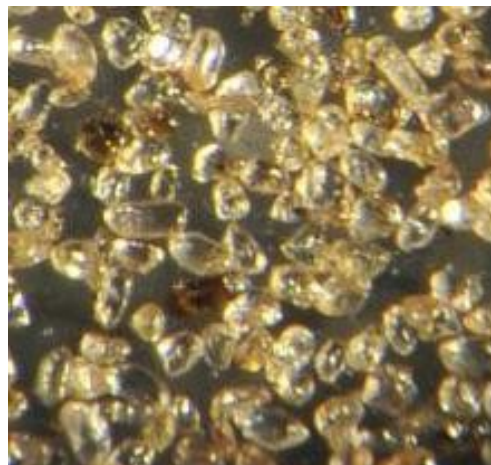
Hodnota pH leží mezi 7 – 10. S rostoucí alkalitou roste spotřeba kyselých katalyzátorů. Ztráty žíháním se u jihoafrických chromitů pohybují pod 0,5%, u finských 1 – 1,5%. Měrná hmotnost 4450 – 4650 kg/m^3 , sypná hmotnost 2500 kg/m^3 , tvrdost 5,5 Mohs. st. Zrna se začínají tavit při 1650 °C, bod sintrace se pohybuje v intervalu 1350 – 1450 °C. Lineární tepelná roztažnost je při 1000 °C 0,7% [3].

Vyznačuje se především hranatými zrny s tupými hranami a hladkým povrchem, černé až grafitové barvy [17]. Mezi přírodními nekřemennými ostřivy má nejvyšší ochlazovací účinek. Je velmi dobře regenerovatelný magnetickou metodou.

Chromitové ostřivo je rozšiřováno hlavně ve slévárnách ocelových odlitků z uhlíkových i legovaných ocelí v kombinaci s furanovými a fenolickými pojivy [6].

3.1.5. Zirkon

Minerál zirkon $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ krystalizuje ve čtverečné soustavě, je hnědočervené barvy. Bývá spolu-produktem při těžbě TiO_2 v pobřežních nalezištích (USA - Florida a Austrálie). Běžně obsahuje stopy hafnia, thoria nebo uranu, které se musí úpravářskými pochody odstranit. Kvalita zirkonových písků roste s koncentrací ZrO_2 [2]. Chemické složení: ZrO_2 62%, SiO_2 32%, Fe_2O_3 0,3%, TiO_2 0,55%, Al_2O_3 0,2%, CaO 0,43% [12].



Obr. 7 Zirkonové ostřívo [18]

Měrná hmotnost zirkonového ostříva (Obr. 7) je 4460 kg/m^3 , sytná hmotnost 2700 kg/m^3 , sintrovací teplota 1500°C , lineární tepelná roztažnost, několikrát nižší než u ostatních běžných ostřiv, je při 1000°C 0,4% [3]. Tvrdost 7,0 - 7,5 Mohsovy st., pH 5,5 - 7,0 [19]. Díky vysoké tepelné vodivosti a vysoké měrné hmotnosti má ostřívo dobrý ochlazovací účinek. Výhodou je, z důvodu vysoké chemické netečnosti vůči oxidům Fe za vysokých teplot, odolnost vůči penetraci a zapékání [6].

Vyznačuje se zakulacenými až kulovitými zrny s hladkým povrchem. Používá se do CT směsí ve spojení s křemenným ostřivem (asi 50 hm. d. : 50 hm. d.). Jádrové směsi se vyznačují výbornou rozpadavostí. Čisté zirkonové ostřívo s fenol-rezolicným pojivem se používá pro nejvíce namáhané části jader. Cena ostříva je vysoká, proto je využíváno v omezené míře [12]. Používá se hlavně do nátěrů forem pro ocelové odlitky, někdy na výrobu forem a pro skořepinové lití [19].

3.1.6. Magnezit

Magnezit je zásadité ostřívo (pH 9,69 – 10) vyráběné z horniny magnezit MgCO_3 , která vedle čistého minerálu obsahuje ještě vápenaté, křemičité a železité sloučeniny. Barva magnezitu se mění od hnědé po bělošedou, je dokonale štěpný [8].

Surový magnezit musí být pálením nejprve zbaven CO_2 a převeden na oxid hořečnatý MgO , krystalizující jako minerál periklas. Periklas je hlavní žáruvzdornou fází a nositelem odolnosti proti korozi oxidy Fe a bazickými taveninami. Tento oxid, podobně jako vápno, pohlcuje na vzduchu vodu a hydratuje. Proto se pálí do slinutí, což je

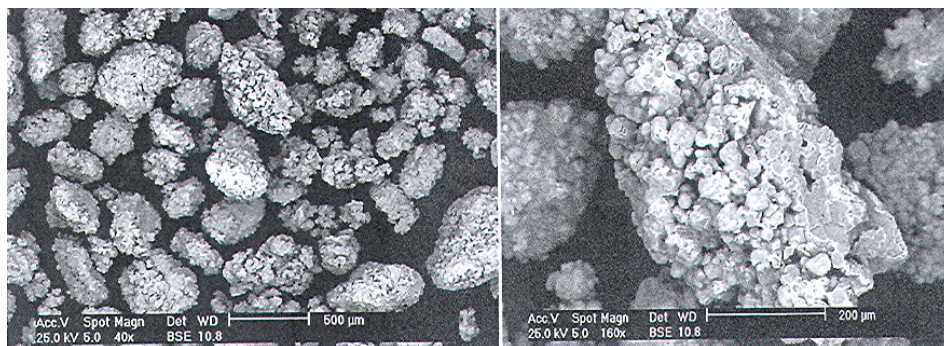
umožněno příměsemi železitých oxidů při teplotách nad 1400 °C. Získává se slinutý magnezit, čokoládově hnědé barvy, který obsahuje více než 85% MgO. Při vypalování na 800 až 950 °C vzniká oduhličený – kaustický magnezit. Metalurgický magnezit je žíhaný na 1500 °C. Značný vliv na jakost magnezitu po vypálení a slinutí mají příměsi. Obsah Fe₂O₃ má být nejvýše 5%, obsah SiO₂ a CaO max. 6% [6] [8]. Chemické složení ostřiva může být následující: 86 – 89% MgO, 7,8 – 8,5% Fe₂O₃, 2,6 – 3,0% CaO, 0,8 – 1,0% SiO₂, 0,2 – 0,3% Al₂O₃ [20].

Měrná hmotnost magnezitového ostřiva je 3510 kg/m³, sypná hmotnost 2000 kg/m³, tvrdost kolem 4 Mohs. st, lineární tepelná roztažnost je při 1000 °C 1,3% [20]. Charakteristický je vysoký koeficient tepelné akumulace.

Jako pojivo se používá především vodní sklo. Nelze jej pojit umělými pryskyřicemi s kyselými tvrdidly.

Kromě využití jako slévárenského ostřiva se používá pro vyzdívání tavicích pecí, kde je velmi odolný proti vlivu zásaditých strusek. Jemně mletý magnezit je možno použít jako plnivo v nátěrech slévárenských forem [6] [8].

V lokalitě Hnúšťa se těží magnezit, který se mineralogicky a chemicky odlišuje. Sintrací při 1750 °C se připravuje bazické ostřivo Jegenit (TS KG 90) (Obr. 8).



Obr. 8 Zrna slinku TS KG 90 [20]

Periklas se žíháním vysoce stabilizuje proti hydrataci. Chemické složení se od magnezitu jiné lokality liší takto: průměrně 89,5% MgO, 5,0 – 5,5% Fe₂O₃, 3,5 – 4,0% SiO₂, 2,4 – 2,6% CaO, 0,2 – 0,4% Al₂O₃. Hodnota pH se pohybuje od 11,2 do 11,6 [20].

Zrna mají po žíhání slepencový charakter, mezi nimi se vyskytují i zrna destičkovitá. Slepencová zrna jsou sice porézní, ale mají téměř kulovitý tvar, který dává směsi vysokou tekutost a spěchovatelnost při nižší spotřebě pojiva. Ve srovnání s dunitem a olivínem má vyšší ochlazovací účinek. Kvůli silně zásadité povaze se nehodí

pro pojení umělými pryskyřicemi tvrditelnými kyselými katalyzátory. Lze jej využít pro CO₂-proces i pro ST směsi vytvrzované estery [20].

Jegenit je vhodný pro formy a jádra odlitků z Mn a Cr ocelí [20].

Mezi další bazická ostřiva patří magnezitchrom s 60% MgO, Cr₂O₃ <20%; a chrommagnezit s 40%MgO a <35% Cr₂O₃ [6].

3.1.7. Šamotový lupek

Šamotem (*Obr. 9*) je označován vypálený žáruvzdorný jíl, který obsahuje nejméně 30 % Al₂O₃. Vypalování břidličnatých jílu (lupků) probíhá v rotačních pecích při teplotách nad 1100 °C. Během vypalování dojde k přeměně kaolinitického jílu na vysoce žáruvzdornou formu aluminosilikátu, mullit 3Al₂O₃ . 2 SiO₂ s bodem tavení 1850 °C [6].



Obr. 9 Zrna šamotového lupku

Žáruvzdornost šamotu závisí především na obsahu Al₂O₃ (čím vyšší obsah Al₂O₃, tím vyšší žáruvzdornost). Podle žáruvzdornosti šamotové lupky rozdělujeme na nízko žáruvzdorné (1670 °C), středně žáruvzdorné (1730 °C) a vysoko žáruvzdorné (nad 1730 °C). Podle poměru SiO₂/Al₂O₃ je lze rozdělit na kyselé, normální, hlinité [8].

Mletím a tříděním (s max. velikostí zrna 3 - 5 mm) získáváme ostrohranné umělé ostřivo, které má plynulou dilatační křivku [6] [8]. Trvalá lineární roztažnost lupkového ostřiva je při 1400 °C -0,5% - ostřivo smršťuje, měrná hmotnost je 2300 kg/m³, sypaná hmotnost 1536 kg/m³ [21]. Šamotové ostřivo neprodělává žádné polymorfní přeměny. Formovací směs není náchylná k tvorbě zálupů.

Jako pojivo se používá kaolinitický jíl (šamotové směsi), vodní sklo (vytvrzované CO₂) a organická pojiva (fenolické a alkydové pryskyřice). Šamotová směs je vhodná pro výrobu forem těžkých ocelových odlitků, nebo těžkých odlitků z litiny s lupínkovým grafitem. V některých slévárnách se používají jako ostřiva drcené zlomky šamotového zboží, vhodné pouze pro přípravu šamotových směsí.

Pro speciální účely se někdy setkáváme s disten-sillimanitovým ostřivem. Jde o minerál sillimanit Al₂O₃ . SiO₂ nacházející se v přírodě. Využívá se pro přípravu speciálních směsí pro výrobu skořepin [6] [8].

3.1.8. Korund

V přírodě se nachází jako minerál safír a korund. Ve slévárenství se využívá umělé ostřívo – elektrokorund (α - Al_2O_3), které se vyrábí tavením bauxitu nebo čistých jílu bohatých na Al_2O_3 a to pálením na $1450\text{ }^\circ\text{C}$, kdy přechází γ - Al_2O_3 na α - Al_2O_3 a zároveň vznikají jednotlivé krystaly korundu (*Obr. 10*). Proces je možné urychlit přísadou 1-2 % TiO_2 , který tvoří s korundem tuhé roztoky a zvětšuje růst krystalů korundu [6] [8].



Obr. 10 Zrna korundu [22]

Teoreticky obsahuje 52,91 % Al. Podle druhu modifikace se měrná hmotnost pohybuje v rozmezí $3300 - 4000\text{ kg/m}^3$. Bod tavení je $2050\text{ }^\circ\text{C}$, tvrdost 9 Mohsovy st. Al_2O_3 má celkem čtyři modifikace (α , β , γ , ξ). Z nichž β a ξ -modifikace nejsou zcela potvrzeny a názory na existenci se různí [6].

γ - Al_2O_3 (gama-korund) – krystalizuje v soustavě s kubickou mřížkou a vzniká ohřevem hydroxidu do $1000\text{ }^\circ\text{C}$. Při vyšších teplotách přechází v modifikaci alfa. Má měrnou hmotnost 3600 kg/m^3 .

α - Al_2O_3 (alfa-korund) – krystalizuje v šesterečné soustavě a patří k vysokoteplotním modifikacím Al_2O_3 , která vzniká z gama modifikace nad $1000\text{ }^\circ\text{C}$. Jeho měrná hmotnost se pohybuje od 3900 kg/m^3 do 4000 kg/m^3 . Modifikace α - Al_2O_3 je vysoce netečná k oxidům Fe, proto se využívá jako ostřívo nejčastěji.

Často se lze setkat i s používáním lacinějšího druhu – kalcinovaným Al_2O_3 , který představuje směs α a γ modifikace, která vlivem přechodu z gama na alfa značně smršťuje.

Používá se společně s jílovými pojivy, vodním sklem i organickými pojivy pro speciální účely. Jeho rozšíření brání vysoká cena, proto se uplatňuje jako plnivo v nátěrech a námazcích forem pro ocelové odlitky a namáhaná jádra [6].

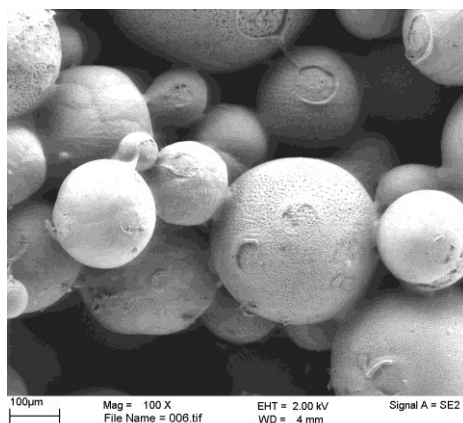
3.1.9. Staurolit

Staurolit je přírodní minerál vyskytující se na Floridě a v Georgii (USA). Je to komplex aluminosilikátu a železa $\text{H}_2\text{FeAl}_4\text{Si}_2\text{O}_{12}$. Vyskytuje se společně s křemenným pískem, turmalinem, zirkonem a dalšími minerály. Typické chemické složení staurolitu je následující: 47% Al_2O_3 , 13% Fe_2O_3 , 2% ZrO_2 , 3% TiO_2 , 4% volného SiO_2 [23]. Jeho velkou nevýhodou je, že při teplotě 1149 °C dochází k velmi výrazné tepelné expanzi, proto se zpracovává žíháním na teploty mezi 1149 – 1260 °C. Takto upravené ostřívo má jen o málo vyšší tepelnou dilataci než zirkonové ostřívo. Zrna mají slepencový charakter a jsou, oproti zrnům před žíháním, méně hranatá. K sintraci zrn ostřiva dochází při teplotách okolo 1468 °C [23].

3.1.10. Cerabeads

Cerabeads (*Obr. 11*) je speciální ostřívo ve formě kuliček vyrobené ze syntetického aluminosilikátu ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Bylo vyvinuto v Japonsku v roce 1997. Chemické složení je následující: Al_2O_3 61%, SiO_2 36,4%, Fe_2O_3 < 1%, MgO 0,11%, CaO 0,11%, TiO_2 < 0,6% [2].

Vyznačuje se žáruvzdorností až 1825 °C. Měrná hmotnost je 2860 kg/m^3 , sypná hmotnost je $1,6 \text{ g/cm}^3$. Díky nízké měrné hmotnosti nabízí snadnou manipulovatelnost a mísitelnost s



Obr. 11 Cerabeads [24]

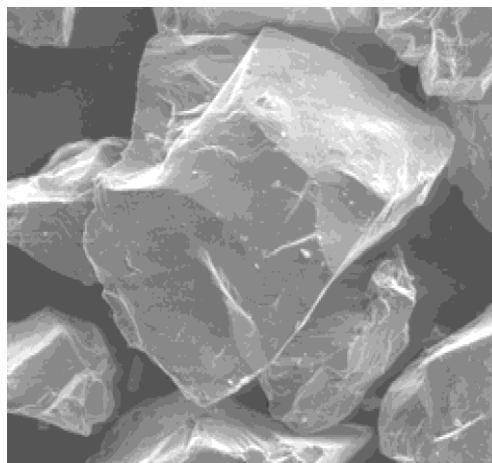
křemenným ostřivem (v poměru 30 - 70%) bez rizika odměšování jednotlivých složek. Cerabeads mají velmi nízkou tepelnou roztažnost, nízkou tepelnou vodivost, vysokou odolnost proti tření a tepelnému šoku [2] [25]. Dalšími výhodami jsou, že kulatá zrna nezpůsobují opotřebování jaderníků a že rozpadavost směsi je po odlití dobrá [26].

Odlitky odlévané do tohoto ostřiva mají hladký, čistý povrch. Ostřívo je možné použít pro všechny pojivové systémy a slouží především pro výrobu jader pro automobilové motory, části hudebních nástrojů, odlitků z manganové oceli [2].

3.1.11. Kerphalite KF

Z mineralogického hlediska se jedná o drcený a tříděný aluminosilikát - andalusit. Složení ostřiva může být následující: $\text{Al}_2\text{O}_3 > 58\%$, $\text{SiO}_2 < 41\%$, Fe_2O_3 do $< 1\%$, $\text{TiO}_2 < 0,2\%$ [2].

Vyznačuje se vysokou žáruvzdorností ($1850\text{ }^\circ\text{C}$). Synná hmotnost (1700 kg/m^3) je blízká synné hm. křemenného ostřiva, proto lze tato ostřiva s výhodou mísit [2]. Měrná hmotnost Kerphalitu (Obr. 12) je 3130 kg/m^3 . Díky



Obr. 12 Kerphalite KF [25]

neutrálnímu pH se hodí pro všechny pojivové systémy, především Cold-box, skořepinové lití, Hot-box, Warm-box, No-bake, Shaw proces i pojení jílovými pojivy, ale kvůli vysoké hranatosti zrn je spotřeba pojiva vyšší. Ve formě moučky se používá do lihových nátěrů forem.

Tepelná roztažnost je nízká, proto se používá do forem a jader, kde zabraňuje vzniku zálpů [25] [27].

3.1.12. Bauxit-sand

Jedná se o speciální ostřivo (Obr. 13) vyrobené firmou Huttenes-Albertus (H-A). Z 75% je tvořen Al_2O_3 . Má neutrální povahu, měrnou hmotnost 2000 kg/m^3 . Hodnota tepelné roztažnosti je velmi podobná chromitovému ostřivu. Značnou nevýhodou je relativně nízká žáruvzdornost. Mezi přednosti patří nižší spotřeba pojiva až o 20%. Používá se v technologiích, jako je Cold Box, Hot Box a No-bake. Při odlévání ocelí často slouží jako náhrada za zirkonové ostřivo [28] [29].



Obr. 13 Bauxit-sand [25]

3.1.13. Orthosilicate [30]

Speciální ostřívo, které představuje alternativu ke křemennému ostřívu a olivínu. Poprvé bylo představeno firmou Green Diamond v roce 1995. Složením je Orthosilicate podobný přírodnímu olivínu: 50,14% SiO₂, 31,35% MgO, 15,87% Fe₂O₃, 1,6% Al₂O₃, 0,67% CaO, 0,14% NiO, 0,13% TiO₂ [30].

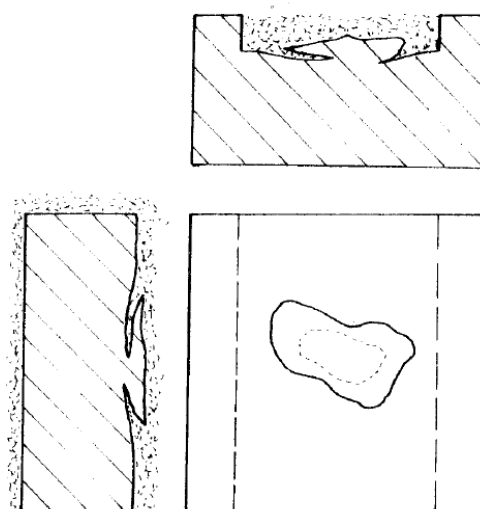
Žáruvzdornost se pohybuje okolo 1454 °C. Vyznačuje se nižší měrnou hmotností, menší tepelnou roztažností. Tepelná vodivost ostřiva je nízká, proto má spíše izolační schopnosti a poskytuje tak výbornou zabíhavost. Tvrdost 6,5 – 7 Mohsovy st. Po odlití má směs výbornou rozpadavost [30].

3.2. Vady z napětí

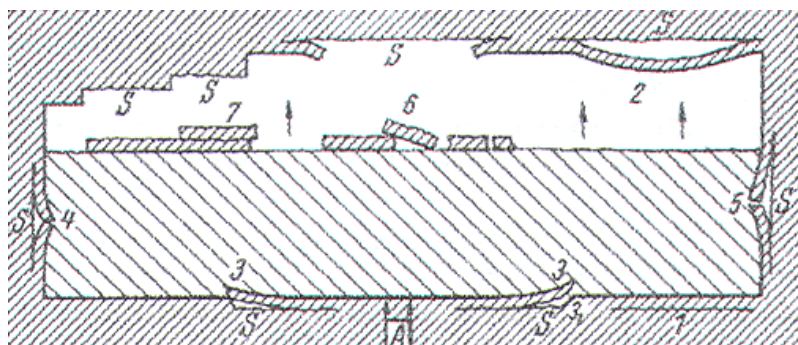
Napětí ve formě vzniká při brzděné tepelné dilataci formovací směsi (dilatace u formovacích směsí s křemennými ostřivy je způsobena přeměnou $\beta(\text{SiO}_2) \rightarrow \alpha(\text{SiO}_2)$ při 573°C). Takto vyvolané napětí, společně s dalšími jevy, může způsobit vady odlitků.

3.2.1. Zálupy

Zálupy (Obr. 14) jsou nepravidelné mělké prohlubně, pouze několik mm silné, zakryté šupinou kovu, vyplněné formovacím materiálem. Vyskytují se na povrchu odlitku (Obr. 15) a řadí se mezi vady třídy 200 (vady povrchu). Tvoří se působením sálavého tepla na horní plochu formy, pokud se jedná o zálupy ve vrchní části odlitku. Zálupy, které se vyskytují na dně formy, jsou způsobené nerovnoměrně proudícím nebo přelévajícím se kovem.



Obr. 14 Zálupy [31]



Obr. 15 Tvorba zálupů v různých místech formy [32]

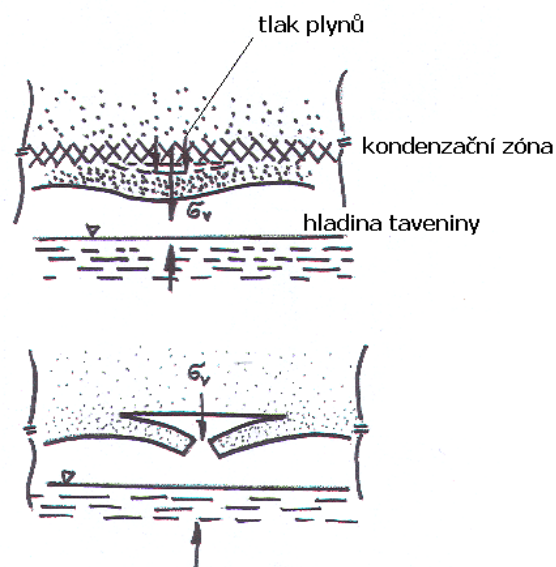
- 1 – oddělení vrstvičky směsi v kondenzační zóně (není vada)
- 2 – vyboulení vrstvy formovací směsi
- 3 – zvedání konců porušené vrstvy, vznik zálupového síťoví
- 3.1 – kov zatekl pod oddělenou vrstvu směsi a vznikl zálup
- 4 – prasklá vyboulenina, bez zalití kovem
- 5 – zálup na boční straně formy zalitý kovem
- 6, 7 – oddělení vrstvy směsi v kondenzační zóně, rozplavení kovem

Mezi jednu z hlavních příčin vzniku zálupů se řadí tepelná dilatace formy a napětí z brzděné dilatace. Proto se tyto vady vyskytují u bentonitových formovacích směsí

s křemenným ostřivem. Kritickým okamžikem je rozmezí teplot 500 – 600 °C, kdy dochází k dilataci křemenného ostřiva. Při brzděné dilataci se vyvíjí napětí, které působí tahem nebo stříhem na nejslabší část formy, kterou je kondenzační zóna.

Kondenzační zóna vzniká při ohřevu formy tekutým kovem. Volná voda se mění v páru a postupuje formou do míst, kde se ochladí na 100 °C a zde také zkondenzuje. Oproti původnímu obsahu vody ve směsi se koncentrace vody v kondenzační zóně zvyšuje 3 až 3,5 krát. Během tuhnutí a chladnutí odlitku se forma prohřívá více do hloubky a kondenzační zóna se posunuje směrem od odlitku, současně se snižuje její tloušťka při zachování stejné koncentrace vody [31].

Na vznik kondenzační zóny má značný vliv druh použitého bentonitu. Vápenaté bentonity jsou, oproti sodným (natrifikovaným) bentonitům, náchylnější k převlhčení. Snižené mechanické hodnoty v kondenzační zóně způsobí odtržení vrstvičky formovacího materiálu. Když hladina kovu dosáhne vydouvající se vrstvičky, zatlačí ji zpět a následně dojde k jejímu prolomení a zaplavení kovem (*Obr. 16*). Zálup se může kovem odplavit a způsobit tak vznik zadrobených míst. V místě, kde zálup odpadl, se vytvoří nárost [8] [31] [32].



Obr. 16 Schéma vzniku zálupů [8]

Vzniku zálupů lze zabránit vhodnou granulometrickou skladbou křemenného ostřiva, dále volbou tvaru zrn ostřiva. Hranatá zrna mají nižší napětí než kulatá a hrubozrnné písky mají menší sklon ke vzniku zálupů než jemnozrnné. Sklon ke vzniku zálupů ovlivňuje také stupeň zhuštění formy, který je tím větší, čím vyšší je hodnota upěchování směsi. Zálupům také předejdeme záměnou křemenného ostřiva za ostřivo s nižší a plynulou tepelnou dilatací (např. zirkon, chromit atd.). Kromě volby

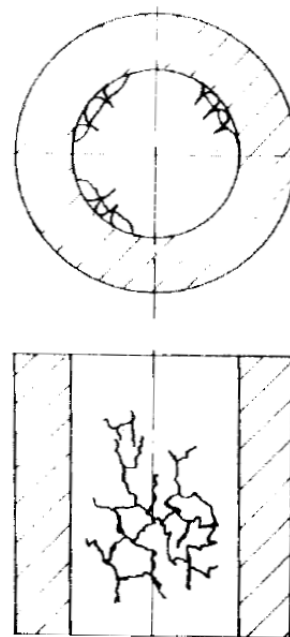
ostřiva lze zabránit vzniku zálupů i vhodnou volbou pojiva, např. použitím natrifikovaného bentonitu. Důležité je také dodržování šikmé polohy při lití rozsáhlých deskovitých odlitků, aby nedocházelo k dlouhodobému působení sálavého tepla na vršek formy. O vzniku zálupů také rozhoduje konstrukce odlitku a lící technika a jakost pojiva [31] [33].

3.2.2. Výronky

Výronky (*Obr. 17*) jsou vystouplé žebrovní nebo žilkové síťové výrostky na povrchu odlitku. Stejně jako zálupy se řadí do třídy vad 200. Tvoří se tak, že kov zatéká do trhlin ve formě, které jsou způsobeny tepelnou dilatací směsi. Vyskytují se především na válcových plochách a zaoblených hranách.

Výronky jsou typické u slitin, které se vyznačují vysokou zabíhavostí, jako je například litina s lupínkovým grafitem a některé neželezné kovy odlévané do forem s křemenným ostřivem pojeným umělými pryskyřicemi. Vznik výronků je nejpravděpodobnější u zaoblených hran, kde tepelné pnutí vyvolává tlakové i tahové pnutí. Vliv pojiva na vznik výronků je značný, protože umělé pryskyřice mají nízkou pevnost v tahu.

K nejpoužívanějším metodám zabránění vzniku výronků je použití oxidů železa v práškovitém (fepren) nebo zrnitém stavu (okuje, železná ruda). Účinek tohoto aditiva je vysvětlován zvýšením tepelné vodivosti směsi a zvýšením pevnosti za vysokých teplot. S jemností oxidů roste i jejich účinnost. Dalším způsobem zabránění vzniku výronků je změna křemenného ostřiva za ostřivo z jiné lokality, popř. úplnou náhradou za nekřemenné ostřivo (např. zirkon, korun atd.). K výraznému potlačení výronků také dochází při použití mechanického regenerátu. Dále je možno využít přísady relaxačních přísad (expandovaný perlit) [31].



Obr. 17 Výronky [31]

3.3. Tepelná dilatace ostřiv

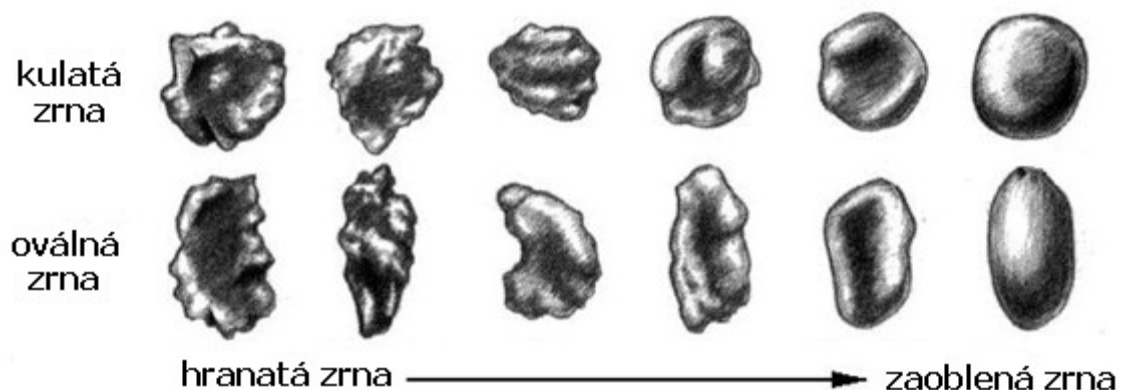
Koeficient tepelné expanze reprezentuje velikost, o kterou se materiál změnil (zvětšil nebo zmenšil), během ohřívání nebo chladnutí. Vysoká hodnota tepelné expanze může být omezující hodnotou pro výrobu tenkostěnných a velmi přesných odlitků. Jevy probíhající ve formě rozhodují o konečné kvalitě odlitků, především se jedná o rozměrovou přesnost, hladkost povrchu a vady z napětí [25].

Tepelnou dilataci směsi lze hodnotit pomocí dilatometrie. Dilatometrie sleduje lineární změny v čase [34]. Výsledkem dilatometrického měření je dilatační křivka.

Na tepelnou dilataci ostřiv má vliv především čistota, tvar, hranatost, zrnitost, sypná hmotnost i mikrodilatace jednotlivých zrn, která se projeví vyšší hodnotou celkové dilatace formy nebo jádra [6].

3.3.1. Tvar zrn

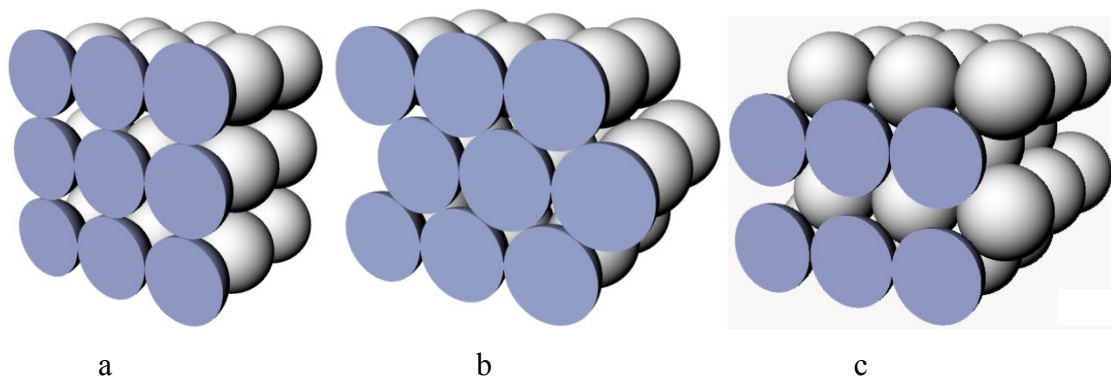
Tvar zrn je v přímé souvislosti s původem jejich vzniku. Zrna přenášená vzduchem (váté písky) mají díky obrušování kulatý tvar. Písky mořské a ledovcové jsou většinou ostrohranné. Charakter tvaru zrn (*Obr. 18*) má vliv na technologické vlastnosti formovacího materiálu.



Obr. 18 Tvar zrn [35]

Kulatá zrna jsou lépe spěchovatelná, směs má větší tekutost, ale mají větší náchylnost ke vzniku vad způsobených tepelnou dilatací. Tepelnou dilataci ovlivňuje také strukturní stavba směsi, kterou lze popsat pomocí koordinačních čísel. Koordinační číslo udává maximálně možný počet dotyků se sousedními zrny při daném stupni zhuštění. Ideální směs je tvořena pouze ostřivem s kulatým tvarem zrn. Při minimálním zhuštění má směs koordinační číslo $K = 6$ (*Obr. 19a*). Maximálnímu zhuštění směsi odpovídá $K = 12$ (*Obr. 19c*). Takto zhuštěná směs již nemá možnost další změny objemu, proto se

projevuje zvýšenou hodnotou tepelné dilatace. Mezi hodnotami koordinačních čísel 6 a 12 je struktura s koordinačním číslem $K = 8$ (Obr. 19b) [6].



Obr. 19 Stavba ideální směsi, a) $K = 6$, b) $K = 8$, c) $K = 12$

Ostřiva s vyšší hranatostí zrn mají nižší spěchovatelnost. S rostoucí hranatostí zrn roste spotřeba pojiva, protože efektivní povrch (povrch, který je smáčen pojivem) hranatých zrn je větší, než povrch zrn kulatých. Na hranách zrn dochází k protrhávání pojivových obálek, což vede ke snížení mechanických vlastností směsí. Zvýšení hodnot mechanických vlastností lze dosáhnout opět větším přídavkem pojiva, což ale může způsobit řadu vad odlitků. Z těchto důvodů nelze hranatá ostřiva efektivně kombinovat s organickými pojivy [6] [8]. Podle Jelínka [6] hranatost vzrůstá s jemností ostřiva.

Koeficient hranatosti W_K lze stanovit z poměru vnějšího měrného povrchu S_W a teoretického vnějšího povrchu, vypočítaného ze síťového rozboru S_{WT} [6]:

$$W_K = \frac{S_W}{S_{WT}} \quad [-]$$

Hodnota W_K je větší než 1. Čím více se tvar ostřiva blíží kouli, tím menší je hodnota W_K .

3.3.2. Granulometrie

Granulometrická skladba ostřiva a její změny mají velký vliv na vlastnosti formovací směsi. Granulometrickým rozbořem lze hodnotit průměrnou velikost zrn ostřiva – d_{50} , specifický povrch, hranatost a zrnitost. K určení zrnitosti se používá především součtová (integrální) křivka sestavená pomocí síťového rozboru, kdy se zkoumaný vzorek ostřiva se prosívá sadou normovaných sít na vysívacím zařízení. Stanoví se hmotnost frakcí na jednotlivých sítích. Hmotnost jednotlivých frakcí se vyjádří v procentech vztažených na hmotnost celého vzorku před stanovením

vyplavitelných látek. Na základě získaných hodnot se nejčastěji sestavuje součtová křivka, kde osa X je v logaritmickém měřítku (\emptyset ok sít), osa Y (% navážky) i vedlejší osa Y (% ostřiva) jsou v dekadickém měřítku [6].

Vyplavitelné látky jsou částice menší než 0,02 mm. Jejich podíl ve směsi se stanovuje sedimentační zkouškou. Rychlost sedimentace je stanovena Stokesovým zákonem [6]:

$$v = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_2 - \rho_1}{\eta} \quad [\text{m.s}^{-1}]$$

kde g – gravitační zrychlení

r – poloměr částic

ρ_1 – měrná hmotnost kapaliny

ρ_2 – měrná hmotnost částic

η – viskozita kapaliny

Podle Jelínka [4] součtová křivka udává spojitý procentuální obsah zrn v závislosti na jejich velikosti. Dříve se pro hodnocení používalo kritérium stupeň stejnorodosti $S = \frac{d_{75}}{d_{25}}$. Hodnoty d_{25} a d_{75} jsou průměry ok sít, kterým odpovídá 25 a 75% z celkové hmotnosti ostřiva. Čím se stupeň stejnorodosti blíží 1, tím je ostřivo stejnoměrnější. Tímto kritériem je ale posuzováno pouze 50% z celkového množství ostřiva, proto se začalo používat hodnocení granulometrické skladby pomocí termodynamické pravděpodobnosti – $\log W$. $\log W$ hodnotí zrnitost ostřiva bez ohledu na součtovou křivku, což je vhodné především u umělých ostřiv. Díky této metodě lze rovněž vypočítat optimální poměr několika frakcí pro přípravu ostřiva o určitých hodnotách objemové hmotnosti, pórovitosti a měrného objemu [4].

Podle Jelínka [6] lze pravděpodobnost uspořádání směsi o i - frakcích vyjádřit vztahem:

$$W = \frac{N!}{N_1! N_2! N_3! \dots N_i!}$$

Za pomoci Stirlingovy přibližné formule, platící s postačující přesností pro celá čísla, lze rovnici upravit na následující logaritmický tvar:

$$\log W = N \log N - \sum N_i \log N_i$$

Jelikož hmotnost všech frakcí uvádíme v %, je $N = 100$. Z toho vyplývá, že:

$$\log W = 200 - \sum N_i \log N_i$$

Protože log pro 0 není definován a $0 \log 0 = 0$, také $1 \log 1 = 0$ a bude-li procentuální obsah menší než 1, bude součin $N_i \log N_i$ záporný, se stanovila pravidla, podle kterých se při výpočtu postupuje takto:

$0 < N_i \leq 0,5$ zanedbáváme

$0,5 < N_i \leq 1$ zaokrouhlujeme na 1,1

U ostřiva se všemi zrny stejných rozměrů je $\log W = 0$.

Volbou vhodné granulometrické skladby lze omezit, nebo zabránit vzniku vad způsobených tepelnou dilatací formovací směsi. Monofrakční písky vyvíjejí větší napětí než písky, ve kterých je zastoupeno více frakcí.

Při přípravě umělých ostřiv se setkáváme se smícháváním dvou nebo více rozdílných frakcí, jejichž poměr je často volen zcela náhodně.

Pro stanovení optimálního poměru několika frakcí se využívá statistických metod. Celkový objem ostřiva lze vypočítat pomocí rovnice:

$$V = S_m \cdot N = a N_1 + b N_2 + c N_3 + \dots x N_i - K \Delta S$$

kde N je celková hmotnost frakcí a $N_1, N_2, N_3 \dots N_i$ jsou hmotnosti jednotlivých frakcí; a, b, c jsou měrné objemy jednotlivých frakcí, S_m je měrný objem, který však nemůže být stanoven analogicky, protože je vždy menší než součet měrných objemů frakcí (jemnější frakce zaujímají místo v mezizrnových prostorech hrubší frakce), součin $K \Delta S$ představuje celkové zmenšení objemu ostřiva, K je konstanta ($K < 0$). Položíme-li celkovou hmotnost $N = 1$, pak lze rovnici upravit:

$$S_m = a N_1 + b N_2 + c N_3 + \dots x N_i - K \Delta S$$

Zmenšení výsledného měrného objemu ΔS lze získat pomocí $\log W$:

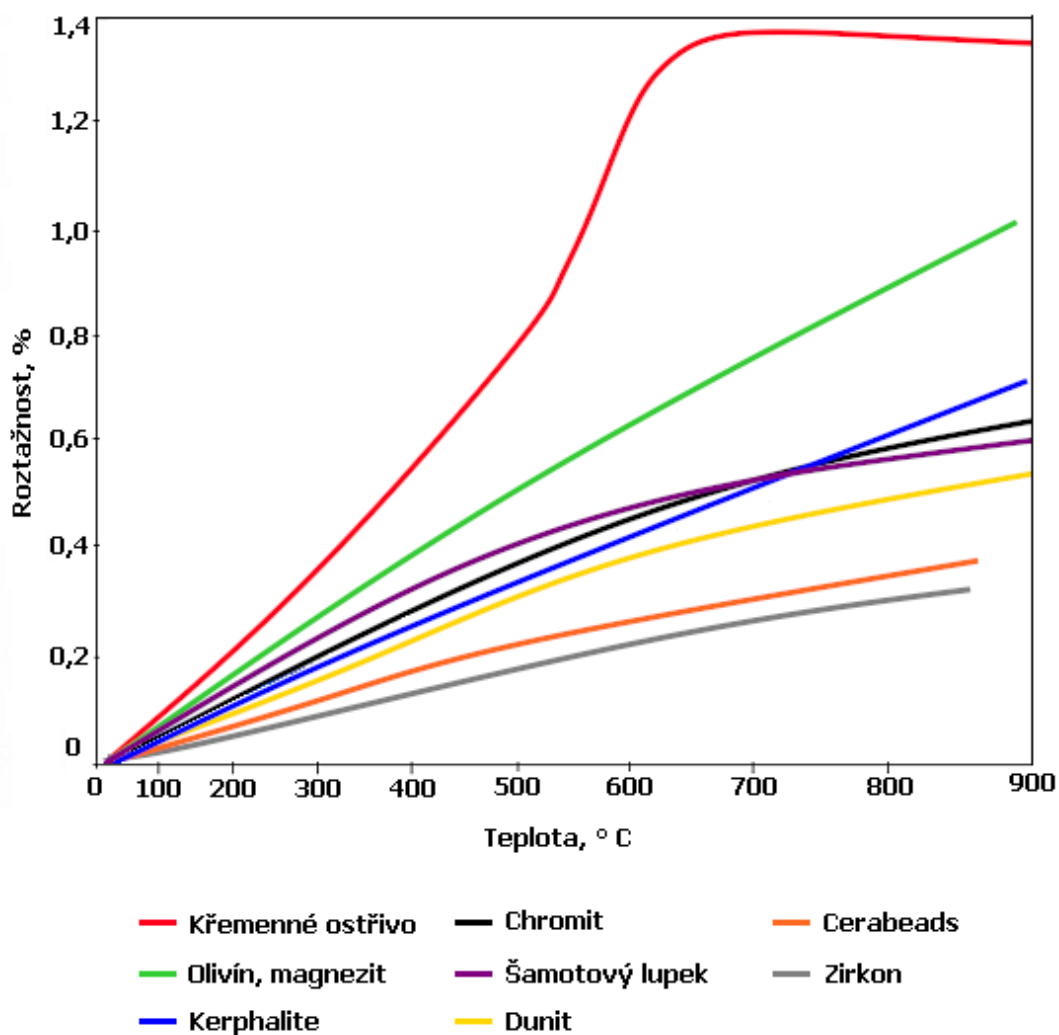
$$\log W = \Delta S = \sum_1^i N_i \log N_i$$

Po dosazení se získá konečný vztah pro výpočet výsledného objemu nově připravovaného ostřiva [6]:

$$S_m = a N_1 + b N_2 + c N_3 + \dots x N_i - K (N_1 \log N_1 + N_2 \log N_2 + \dots N_i \log N_i)$$

3.3.3. Tepelná dilatace různých druhů ostřiv

Hodnoty tepelné dilatace křemenného ostřiva a několika druhů nekřemenných ostřiv lze porovnat podle obrázku (Obr. 20).

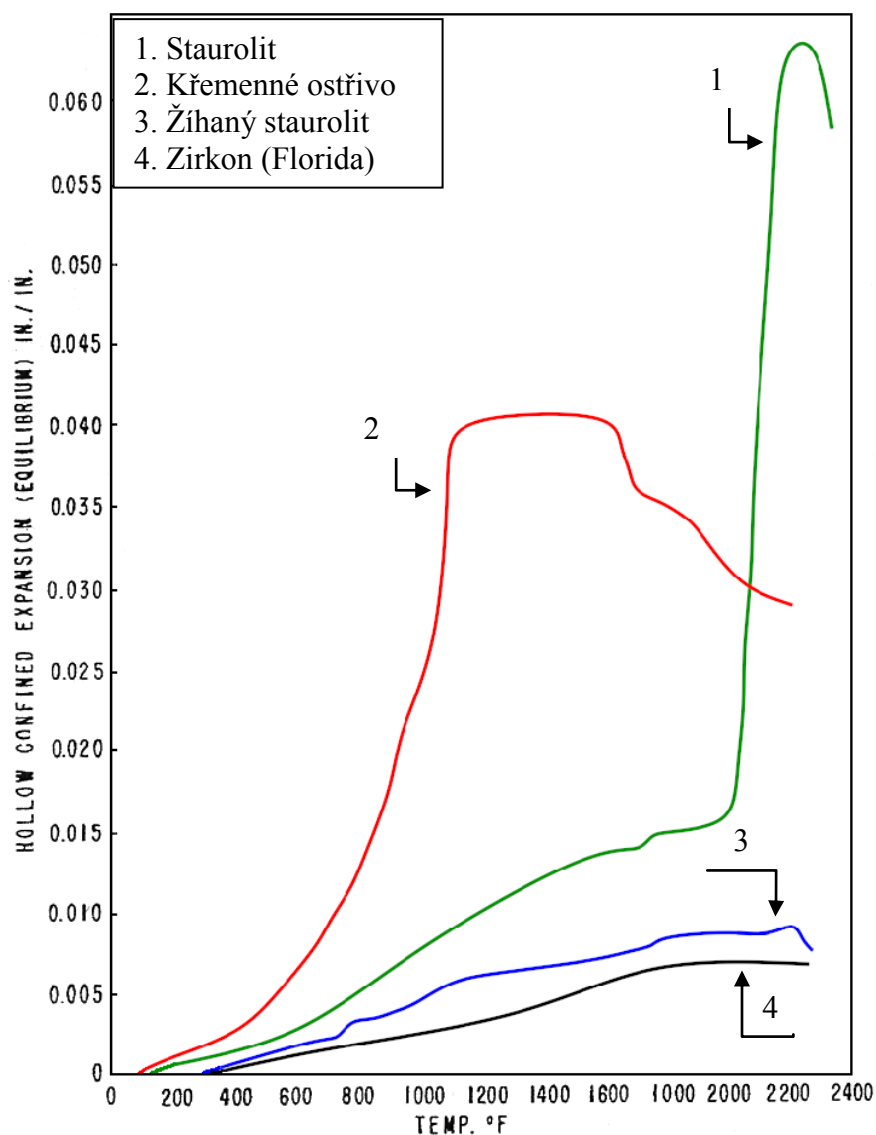


Obr. 20 Dilatace jednotlivých druhů ostřiv [2] [3]

Křemenné ostřivo má diskontinuální tepelnou dilataci, která je patrná z tvaru křivky. Diskontinualita je způsobena modifikačními změnami $\beta(\text{SiO}_2) \leftrightarrow \alpha(\text{SiO}_2) \rightarrow$ cristobalit.

Všechna nekřemenná ostřiva mají plynulou dilatační křivku (neprochází modifikačními změnami) a jejich celková dilatace je podstatně menší, oproti křemennému ostřivu. Tato vlastnost nekřemenných ostřiv může být využita například při prevenci vad odlitků způsobených napětím.

Nekřemenné ostřivo staurolit má v přírodním stavu také neplynulou dilataci, která navíc svými hodnotami převyšuje dilataci křemenného písku. Po zpracování staurolitu žíháním se jeho dilatace sníží až na úroveň dilatace zirkonu (Obr. 21).



Obr. 21 Dilatační křivky staurolitu, zirkonu a křemenného ostříva [23]¹

Značný vliv na celkovou dilataci formovací směsi má také druh pojivového systému a obsah pojiva, protože různě silná pojivová obálka má na dilataci rozdílný tlumivý účinek [36].

¹ Přepočet ° F na ° C: $200^{\circ} \text{F} - 32 = 168$; $168 \cdot 5 = 840$; $\frac{840}{9} = 93,3^{\circ} \text{C}$

4. Experimentální část

4.1. Použité suroviny

Křemenná ostřiva použitá k experimentům byla vybrána s přihlédnutím na tvar a velikost zrn. Cílem bylo prokázat vyšší dilataci kulatých zrn oproti zrnům hranatým a vyšší dilataci větších zrn oproti zrnům menším.

Hodnocená ostřiva pochází ze sbírek pískové laboratoře Katedry slévárenství VŠB – TU Ostrava.

4.1.1. Šajdíkové Humence (ŠH 35)

Ostřivo Šajdíkové Humence bylo pro diplomovou práci vybráno jako standard.

Jedná se o váté písky s kulatým tvarem zrn z ložiska nacházejícího se při dolním toku Moravy a Myjavy na Slovensku. Používá se ve slévárnách litiny s lupínkovým grafitem, ale příliš se nehodí pro odlévání oceli [6]. Důvodem je vysoký obsah živců, který je podle Lichého [37] následující: orthoklasy $4,39 \pm 0,93\%$, plagioklasy a oligoklasy $2,42 \pm 0,66\%$.

Chemické složení a vlastnosti udávané [38]: SiO_2 96 %, Fe_2O_3 0,18%, Al_2O_3 1,8%. Odplavitelné podíly 0,2%, ztráty žiháním (1100°C) 0,3%.

4.1.2. Grudzeń Las

Polské křemenné ostřivo těžené v Tomaszowském údolí. Vyznačuje se zaoblenými zrny. Je vhodné pro odlévání litin, ocelí i slitin neželezných kovů [39]. Chemické složení dle [40]: SiO_2 99,3 – 99,6%, Fe_2O_3 0,03 - 0,05%, TiO_2 0,04 – 0,10%. Vyplavitelné látky max. 0,20%, ztráta žiháním 0,15 – 0,19%.

4.1.3. Provodín

Provodín leží 8 km jihovýchodně od České Lípy. Zrna písku mají mírně zaoblené hrany a jsou doprovázena jílovými pojivy. Získaná surovina se dále zpracovává tříděním a praním. Vyznačuje se podílem SiO_2 nad 98% a malými podíly oxidů železa a titanu [41]. Chemické složení dle [40]: SiO_2 98,5%, Fe_2O_3 0,05%, Al_2O_3 0,4%. Vyplavitelné látky max. 0,15%, ztráta žiháním 0,3%.

4.1.4. Olivín

Olivín je přírodní, světle zelená surovina sopečného původu s vysokým obsahem hořčíku. Nejbohatší naleziště v Evropě je v Norsku (Åaheim). Po těžbě se dále zpracovává mletím, tříděním a sušením. Skládá se z tuhého roztoku dvou křemičitanů – forsteritu Mg_2SiO_4 (93%), a fayalitu Fe_2SiO_4 (6%) [6].

4.1.5. Dunit

Dunit je podobný svým chemickým složením olivínu. Ostřivo, tmavě hnědé barvy, se připravuje sintrováním. Zrna po takovém zpracování mají porézní charakter. Ostřivo se dále upravuje a třídí podle požadované zrnitosti [3].

4.1.6. Šamotový lupek

Jedná se o umělé ostřivo připravované vypalováním kaolinitického jílu na teploty nad $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, při kterých vzniká mullit $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. Typická ostrohranná zrna vznikají drcením. Vyznačuje se vysokou žáruvzdorností až nad $1730\text{ }^{\circ}\text{C}$ [8].

4.1.7. Kerphalite

Kerphalite je z mineralogického hlediska aluminosilikát - andalusit. Zpracovává se drcením a tříděním. Charakteristická je pro něj vysoká žáruvzdornost – až $1850\text{ }^{\circ}\text{C}$. Díky nízké tepelné dilataci se používá do forem a jader, kde zabraňuje vzniku zá lupů [6].

4.1.8. Chromit

Chromitové ostřivo, získávané těžbou chromitové rudy především v Jihoafrické republice, se po těžbě třídí podle zrnitosti a odprašuje. Chromit je tuhý roztok ferochromitu $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, picrochromitu $\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, spinelu $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, hercynitu $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ a magnesioferitu $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. Typickým rysem jsou izometrická černá zrna. Vyznačuje se vysokou tepelnou vodivostí [6].

4.1.9. Specialsand CKL 450

Jedná o aluminosilikát světlé barvy, který se vyznačuje izometrickým tvarem zrn s členitým povrchem. Ostřivo je vysoce tříděno a obsahuje jen úzké rozmezí frakcí.

4.2. Metodika měření

Provedené analýzy slouží k hodnocení fyzikálních a chemických vlastností, které společně se snímkováním na SEM, a granulometrickým rozbořem poskytují detailní informace o jednotlivých ostřivech. Díky těmto informacím je možné predikovat chování ostřiv během tepelné expozice – např. předpokládat míru dilatace s ohledem na tvar a velikost zrn.

Dilatometrické analýze byly podrobeny vzorky křemenných ostřiv (Šajdíkové Humence ŠH 35 (standard), Grudzeń Las a Provodín), kde byl hodnocen především vliv tvaru a velikost zrn na celkovou dilataci; dále olivín, dunit a šamotový lupek. Změření dilatace těchto ostřiv by mělo sloužit jako základ pro sestavení hybridního ostřiva s lineárnějším průběhem dilatace. Výše zmíněná nekřemenná ostřiva byla vybrána především s ohledem na podobnou sypnou hmotnost s ostřivem Šajdíkové Humence, (aby nedocházelo ke gravitačnímu odmíšení) a ekonomickou dostupnost.

4.2.1. Granulometrický rozbor

Granulometrický rozbor ostřiv byl proveden pomocí laserového analyzátoru Mastersizer 2000 v Laboratoři sypkých hmot na Institutu dopravy Fakulty strojní VŠB – TU Ostrava. Výstupem měření je protokol (Příloha I – X, souhrn naměřených hodnot je v *Tab. 1*), v němž je velikost a procentuální zastoupení velikosti zrn zobrazena i graficky.

Hodnocení granulometrie pomocí síťového rozboru bylo provedeno pouze u standardu, za který bylo zvoleno ostřivo Šajdíkové Humence. Ze síťového rozboru se vycházelo při sestavování hybridních ostřiv.

Před síťovým rozbořem standardu ŠH 35, prováděným na sadě 10ti normovaných sít, se stanovily vyplavitelné podíly v %. Ze získaných výsledků se sestrojila součtová křivka (*Obr. 22*), stanovil se $\log W$, d_{50} , d_{75} , d_{25} , stupeň stejnorodosti S , povrch jednotlivých frakcí a teoretický vnější povrch S_{WT} (*Tab. 3*).

4.2.2. Hodnocení hranatosti (SPHT)

Analýza byla realizována na stejném pracovišti jako granulometrický rozbor. Oproti koeficientu hranatosti (který je větší než 1 a hodnotí velikost povrchu částic - ideální koule má nejmenší rozdíl mezi vnějším povrchem a teoretickým povrchem, hodnota $W_k = 1$ [6]), hodnotí tato analýza vzdálenost bodů od povrchu ke středu částice, hodnota je menší než 1 (ideální koule má hodnotu $SPHT = 1$). Protokoly měření jsou v přílohách (Příloha XIII – XXI, hodnoty SPHT jsou shrnuty v *Tab. 1*).

4.2.5. Stanovení pH vodního výluhu

Stanovení pH bylo provedeno na přístroji WTW Inolab pH/Cond level 1. Navážka ostřiva 10g byla míchána ve 100 ml destilované vody po dobu 5 min [42]. Následně bylo pomocí sondy zjištěno pH. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v *Tab. 1*.

4.2.6. Ztráty žíháním

Ztráty žíháním udávají změnu hmotnosti, oproti původní váze vzorku, v procentech obsahu spalitelných látek a hydroxylové vody obsažené v ostřivu [40]. Vzorek ostřiva se žíhal 2 hodiny při 900 °C [42]. Výsledky jsou zobrazeny v *Tab. 1*.

Ztráty žíháním chromitu a dunitu byly, z důvodu oxidace některých oxidů Fe ($\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$) na povrchu zrn [6], stanoveny následujícím způsobem: do vyžíhaného korundového kelímku se navážil vysušený vzorek ostřiva. Výška vzorku v kelímku nemá překročit 3mm. Kelímek se vzorkem se vložil do žíhací pece vytemperované na 550°C a ponechal se na této teplotě 1 hodinu. Po vyjmutí a vychladnutí v exsikátoru se zvážil a úbytek hmotnosti se přepočítal na % [43].

4.2.7. Hodnocení tvaru zrn a chemické složení

Snímky zrn ostřiv a EDX analýzy (*Tab. 4*) byly získány pomocí skenovacího elektronového mikroskopu Aspex PSEM eXplorer v Centru pokročilých a inovačních technologií VŠB – TU Ostrava. Pro hodnocení tvaru zrn a zjištění chemického složení bylo použito zvětšení 50x a 100x.

4.2.8. Měření tepelné dilatace

Tepelná dilatace byla měřena na přístroji NETZSCH DIL 402 C7 v rozmezí teplot 20 – 1100 °C. Ohřev vzorku probíhá v horizontální peci v inertní atmosféře argonu. Dilatometr snímá délkové změny vzorku, který je umístěn mezi dvěma válečky v dutém válcovém přípravku. Dilatace vzorku je registrována induktivním snímačem (pohybem feromagnetického jádra v cívice) [44]. Kromě dilatačních křivek byl také stanoven koeficient tepelné expanze v rozmezí teplot 20 – 1100 °C (*Tab. 5, Obr. 60*). Protokoly z měření jsou v přílohách (Příloha XXII – XXVIII).

4.3. Dosažené výsledky

Tab. 1 Výsledky granulometrické a chemické analýzy

	ŠH 35	Provodín	Gr. Las	Specialsand	Olivín	Dunit	Šam. lupek	Kerphalite	Chromit
$d_{50} \text{ [mm]}^2$	0,36/ 0,246	0,353	0,245	0,319	0,208	0,338	1,208	0,323	0,434
$d_{0,1} \text{ [mm]}$	0,170	0,195	0,154	0,236	0,104	0,120	0,871	0,204	0,195
$d_{0,5} \text{ [mm]}$	0,245	0,353	0,243	0,320	0,278	0,306	1,188	0,324	0,413
$d_{0,9} \text{ [mm]}$	0,354	0,638	0,371	0,432	1,128	0,599	1,562	0,514	0,834
Span= ($d_{0,9} - d_{0,1}$)/ d_{25} [-]	0,748	1,254	0,934	0,611	3,676	1,563	0,581	0,956	1,548
$\log W \text{ [-]}^3$	61,5/ 92,03	111,99	100,65	83,87	138,89	126,63	89,71	101,18	121,27
$S_{WT} \text{ [m}^2\text{/g]}$	0,0254	0,0188	0,0262	0,6063	0,0287	0,127	0,0052	0,0197	0,0171
SPHT [-]	0,905	0,855	0,856	0,923	0,846	0,838	0,831	0,837	0,923
AFS číslo [-]	55,16	40,51	59,82	46,29	56,43	48,26	12,34	50,75	51,1
pH [-]	7,9	7,6	7,9	8,4	8,9	9,6	7,9	7,3	8,4
ztráta žiháním [%]	0,24	0,05	0,09	0,006	0,3	0,01	0,06	0,06	0

Z výše uvedené tabulky vyplývají závěry, že největší střední zrno (d_{50}) má šamotový lupek (1,208 mm), naopak nejmenší hodnota je u olivínu (0,208 mm). Olivín ovšem vykazuje nejrovnoměrnější výskyt frakcí, o čemž vypovídá hodnota $\log W = 138,89$. Nejméně rovnoměrné zastoupení frakcí má Specialsand, $\log W = 83,87$. Zrna, která se svým tvarem nejvíce přibližují kouli má chromit s hodnotou SPHT = 0,923, naopak nejhranatější je šamotový lupek, SPHT = 0,832. Nejvyšší ztráta žiháním je u křemenného ostřiva Šajdíkové Humence (0,24%), což ukazuje na vyšší obsah spalitelných látek (vysoký obsah živců), oproti jiným ostřivům.

² Hodnota d_{50} ostřiva ŠH 35 před lomítkem je odečtená z granulometrického rozboru

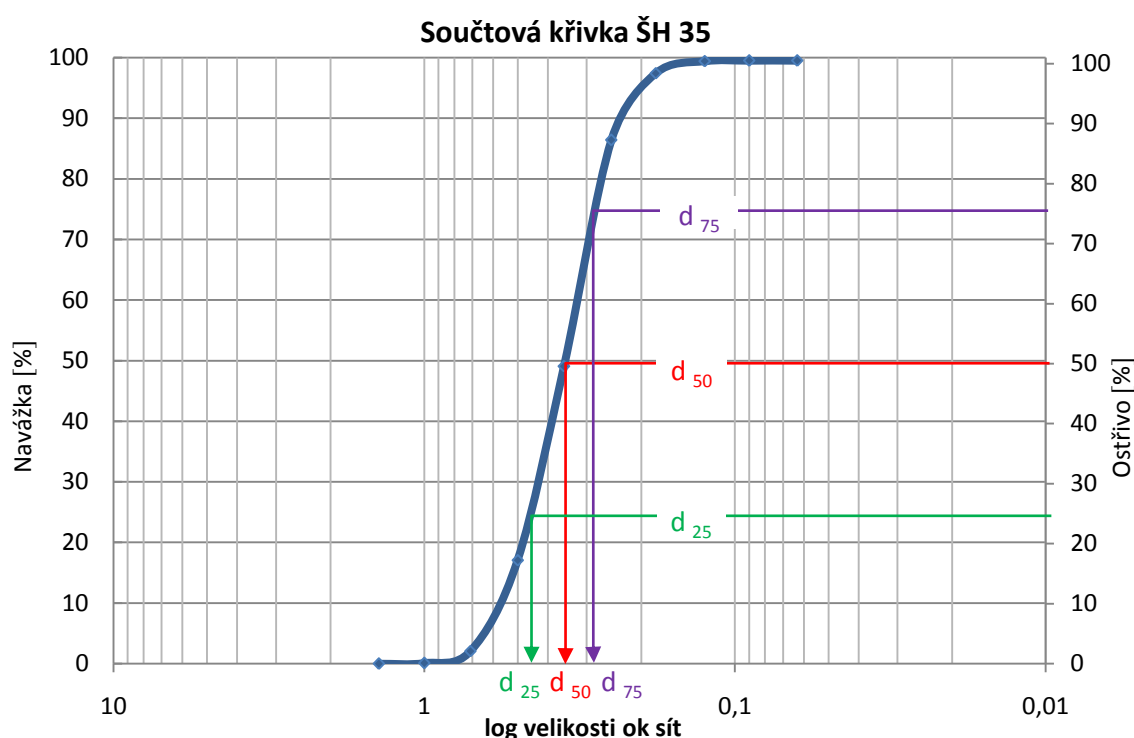
³ Hodnota $\log W$ ostřiva ŠH 35 před lomítkem je vypočtena ze síťového rozboru. Hodnota je nižší, protože se hodnotí zbytek na 10ti sítích, zatímco $\log W$ vypočtený z laserové analýzy hodnotí frakce od 0,02 - 2000,0 μm .

4.3.1. Granulometrický rozbor ostřiva ŠH 35 (sítový rozbor)

V Tab. 2 jsou hodnoty získané granulometrickým rozbořem. Podíly jednotlivých frakcí jsou v gramech a v procentech vztažených k hmotnosti navážky před a po stanovení odplavitelných podílů, dále je zde vypočítán log jednotlivých frakcí (tato hodnota dále poslouží pro výpočet log W) a povrch frakcí. Součtová křivka sestavená na základě sítového rozboru je na Obr. 22.

Tab. 2 Granulometrická skladba ostřiva ŠH 35

Navážka písku		99,9 g						
Vyplavitelné podíly		0,4 g						
síta [mm]	zbytek na síti [g]	navážka [%]	ostřivo [%]	Ni log Ni	součet [%]	střední zrno d [cm]	faktor 2,29/d	povrch frakce [cm ²]
1,400	0,0	0,0	0,0		0,0	0,14	16,36	0
1,000	0,1	0,1	0,1		0,1	0,12	19,08	1,908
0,710	2,0	2,0	2,0	0,602	2,1	0,09	26,94	53,88
0,500	15,0	15,0	15,1	17,641	17,1	0,06	38,17	572,55
0,355	32,0	32,0	32,2	48,164	49,1	0,04	57,25	1832
0,250	37,3	37,3	37,5	60,032	86,4	0,03	76,33	2847,109
0,180	11,0	11,0	11,1	11,455	97,4	0,02	114,5	1259,5
0,125	2,0	2,0	2,0	0,602	99,4	0,015	152,67	305,34
0,090	0,1	0,1	0,1		99,5	0,011	208,18	20,818
0,063	0,0	0,0	0,0		99,5	0,008	286,25	0
podsítné	0,0	0,0	0,0		99,5	0,004	572,5	0
Σ	99,5	100,0	100,0	138,5	99,5			6893,105



Obr. 22 Součtová křivka ostřiva ŠH 35

Hodnoty d_{25} , d_{50} a d_{75} jsou v *Tab. 3*. Na základě těchto hodnot byl vypočítán stupeň stejnorodosti S . V tabulce je také hodnota $\log W$ a teoretický vnější měrný povrch S_{WT} .

Tab. 3 Hodnoty získané ze síťového rozboru

$\log W$ [-]	d_{50} [mm]	d_{25} [mm]	d_{75} [mm]	$S = \frac{d_{75}}{d_{25}}$ [-]	S_{WT} [m ² /g]
61,5	0,36	0,46	0,29	0,63	0,0069

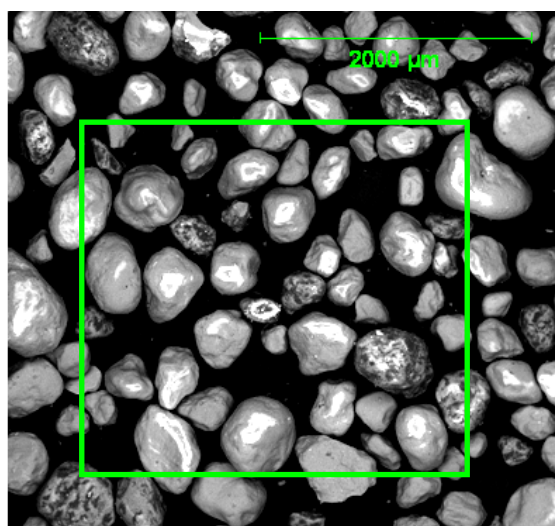
$$\log W = 200 - 138,5 = 61,5$$

$$S_{WT} = \frac{6893,105}{99,5} = 69,65 \text{ cm}^2/\text{g} = 0,0069 \text{ m}^2/\text{g}$$

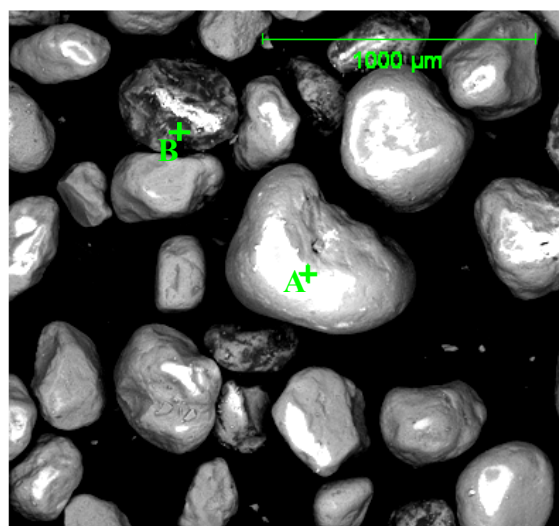
4.3.2. Hodnocení tvaru zrn a EDX analýzy

Tab. 4 Chemické složení získané EDX analýzou (hodnoty v hmotnostních procentech)⁴

		ŠH 35	Provodín	Gr. Las	Specialsand	Olivín	Dunit	Šam. lupek	Kerphalite	Chromit
Si	plošná	21,8	23,4	23,2	9,3	7,8	7,7	10,7	6,6	3,0
	bodová	11,7	14,7	33,3	9,9	8,3	2,9	9,7	6,9	3,1
O	plošná	77,0	76,6	76,8	74,8	78,5	74,7	73,3	74,8	65,5
	bodová	82,7	85,3	66,7	75,0	77,5	65,5	80,0	71,0	60,4
Mg	plošná					12,0	13,4			1,9
	bodová					11,4	8,1			1,6
Al	plošná	1,1			14,8			12,8	18,6	3,0
	bodová	4,5			15,1			10,3	22,1	3,1
K	plošná							2,0		
	bodová	1,1								
Cr	plošná									19,2
	bodová									23,2
Fe	plošná					1,7	4,2	1,2		10,4
	bodová					2,8	23,4			11,7
Ti	plošná				1,1					
	bodová									



50x

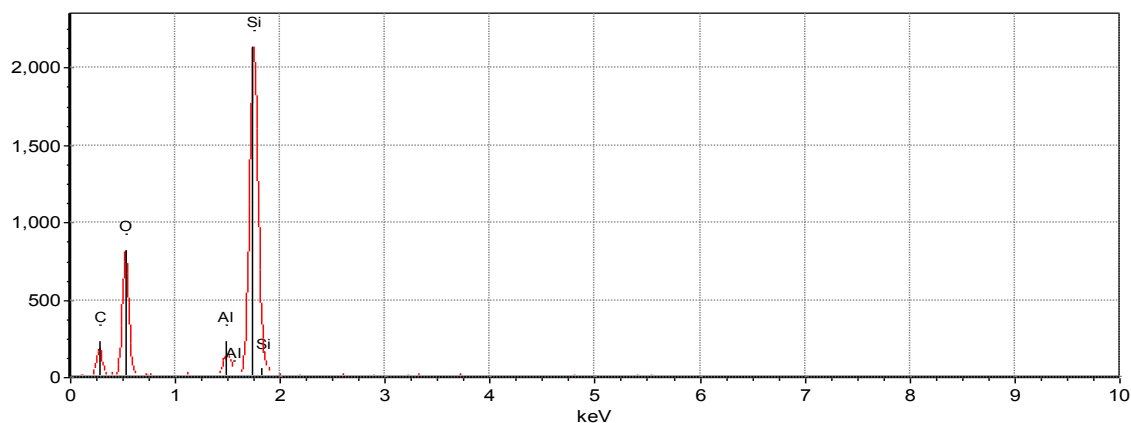


100 x

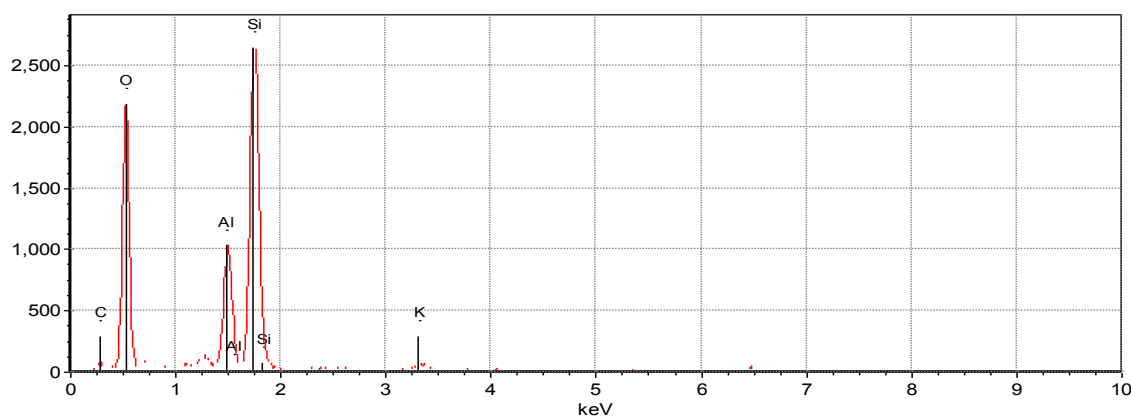
Obr. 23 Zrna křemenného ostřiva ŠH 35

⁴ Bylo stanoveno zastoupení prvků nad 1 hm%.

Zrna ostřiva ŠH 35 (*Obr. 23*) jsou zaoblená, což ukazuje na jejich alochtonní původ. Povrch zrn je hladký, bez prasklin. Některá zrna vyskytující se v tomto vzorku jsou znečištěná. Pomocí EDX analýzy v bodě B bylo vyhodnoceno, že tyto nečistoty mají následující složení (hodnoty v hm.%): 72,1% O, 15,4% Si, 8,4% K, 5% C, 4,1% Al. Na *Obr. 23* je zobrazena plocha a body, v nichž byla provedena EDX analýza ostřiva. Výsledky analýzy plošné analýzy jsou na *Obr. 24*, analýza v bodě A je zobrazena na *Obr. 25*. Výsledky bodové analýzy v bodě B jsou v přílohách (Příloha XI).

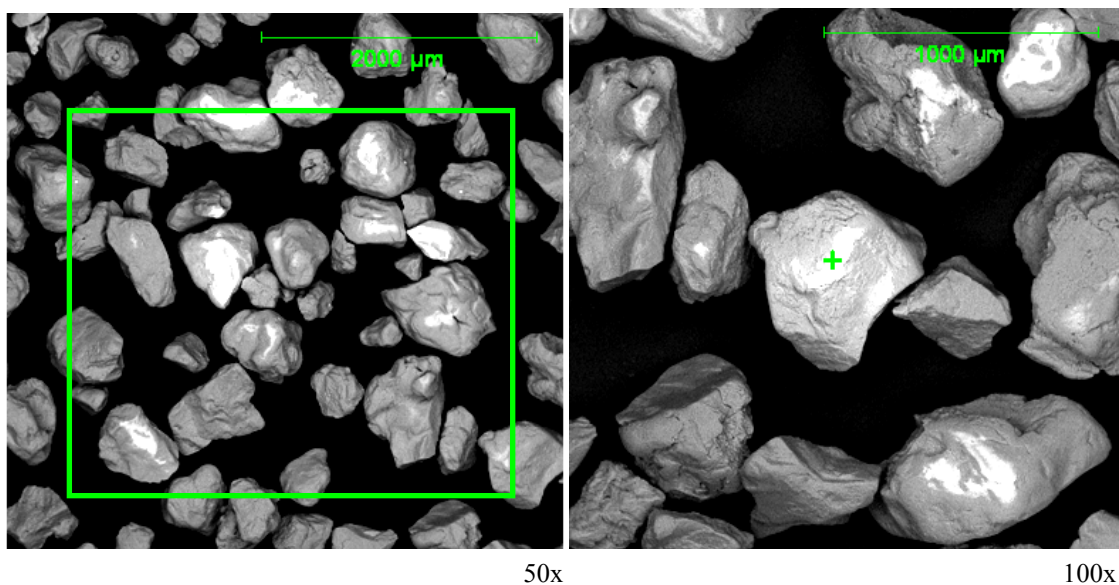


Obr. 24 Plošná EDX analýza⁵ ostřiva ŠH 35



Obr. 25 EDX analýza v bodě A, ostřivo ŠH 35

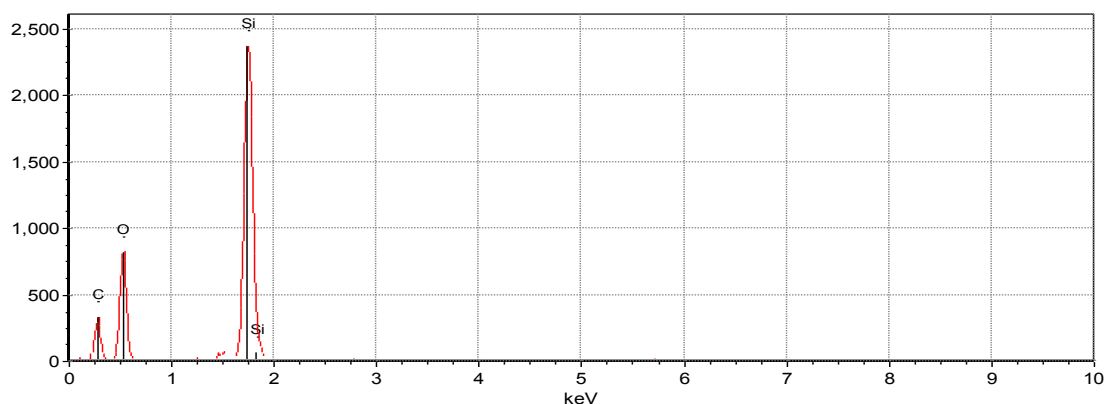
⁵ Zrna ostřiva jsou nalepena na uhlíkové pásce, proto plošná EDX analýza vykazuje obsah uhlíku



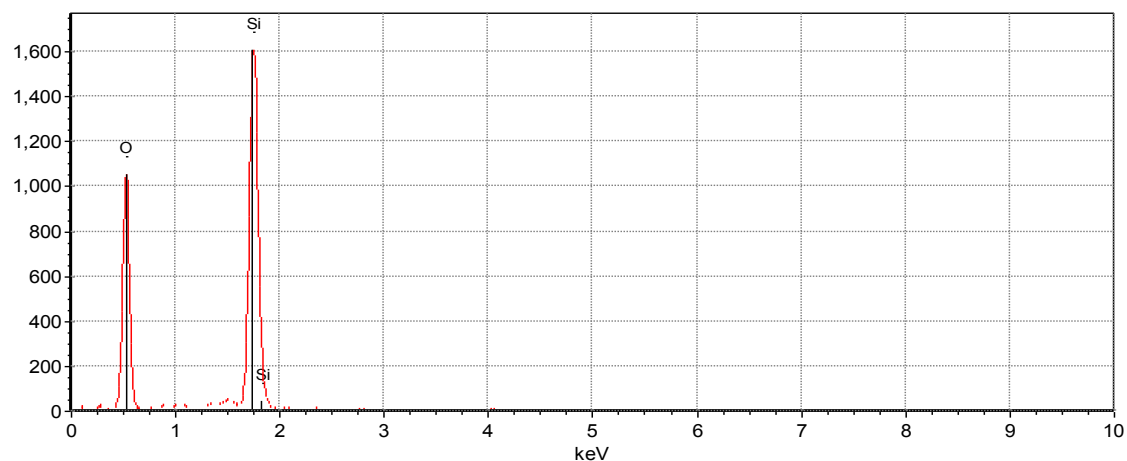
Obr. 26 Zrna křemenného ostřiva Provoďín

Charakter zrn křemenného ostřiva z lokality Provoďín (*Obr. 26*) se mění od izometrického po protáhlý. Hrany zrn jsou ostré nebo mírně zaoblené, povrch je hladký a bez nečistot.

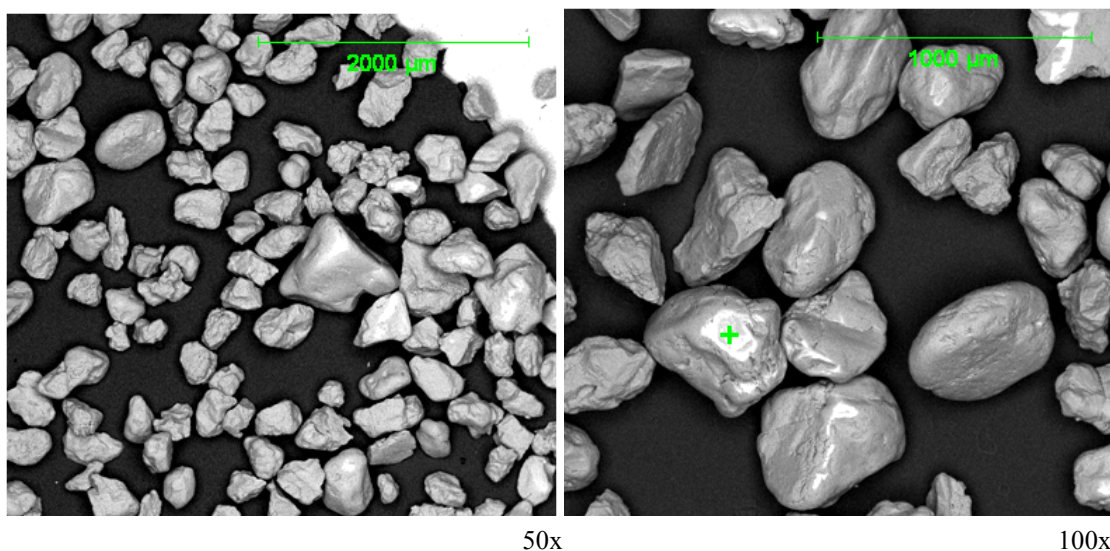
Na *Obr. 27* a *28* je plošná a bodová EDX analýza.



Obr. 28 Plošná EDX analýza ostřiva Provoďín

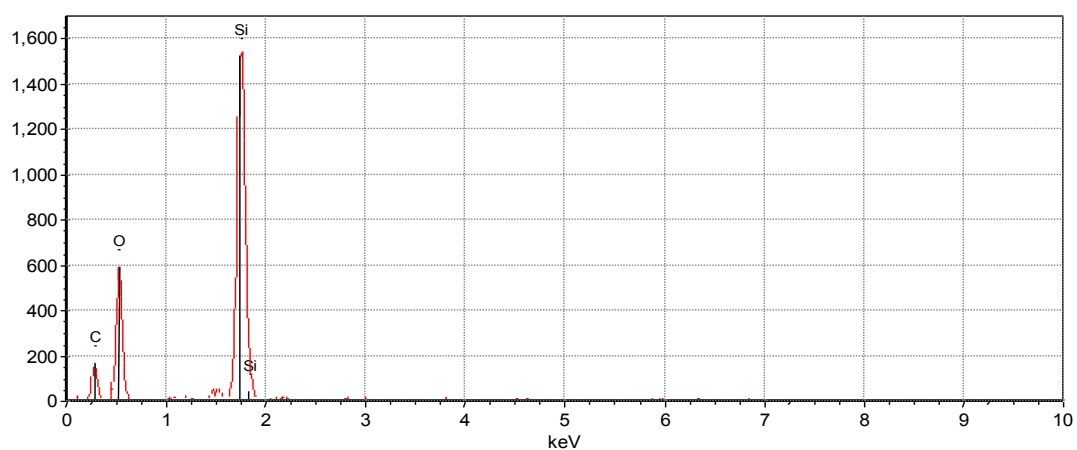


Obr. 27 Bodová EDX analýza ostřiva Provoďín

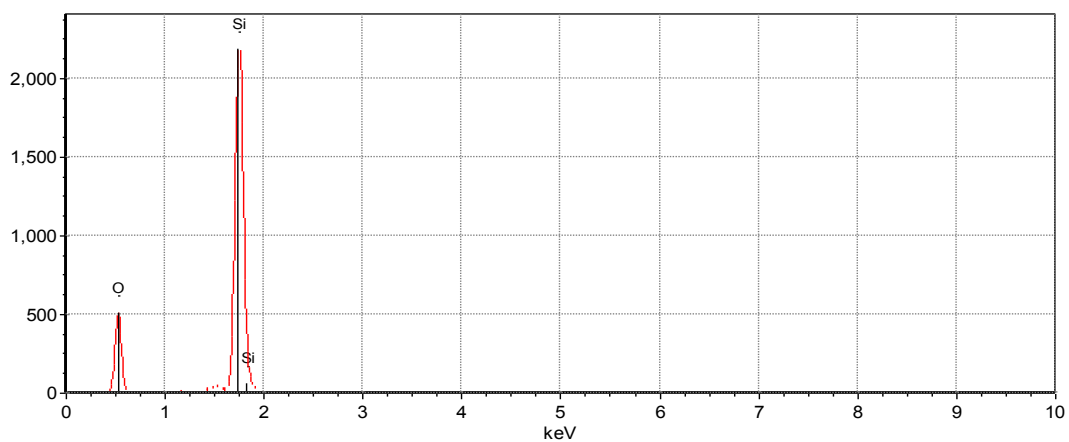


Obr. 29 Zrna ostřiva Grudzeň Las

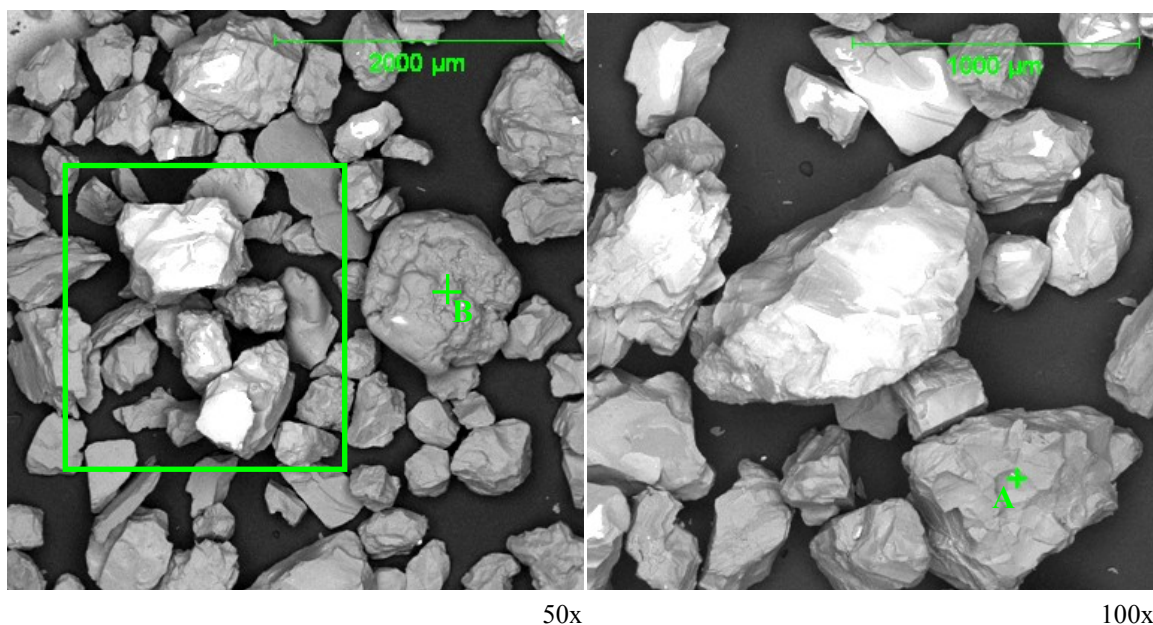
Zrna ostřiva Grudzeň Las (*Obr. 29*) mají izometrický tvar zrna se zaoblenými hranami a polodrsným povrchem. Některá zrna jsou ostrohranná.



Obr. 30 Plošná EDX analýza ostřiva Grudzeň Las

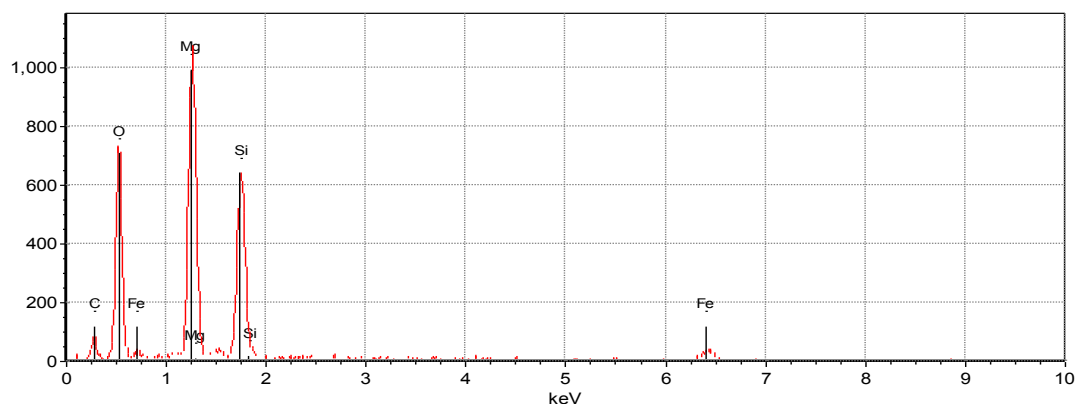


Obr. 31 Bodová EDX analýza ostřiva Grudzeň Las

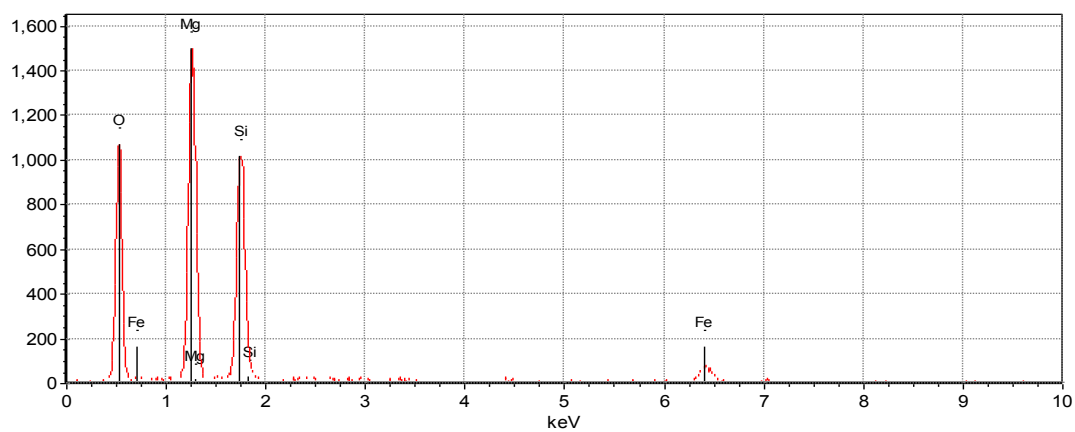


Obr. 32 Zrna olivínového ostřiva

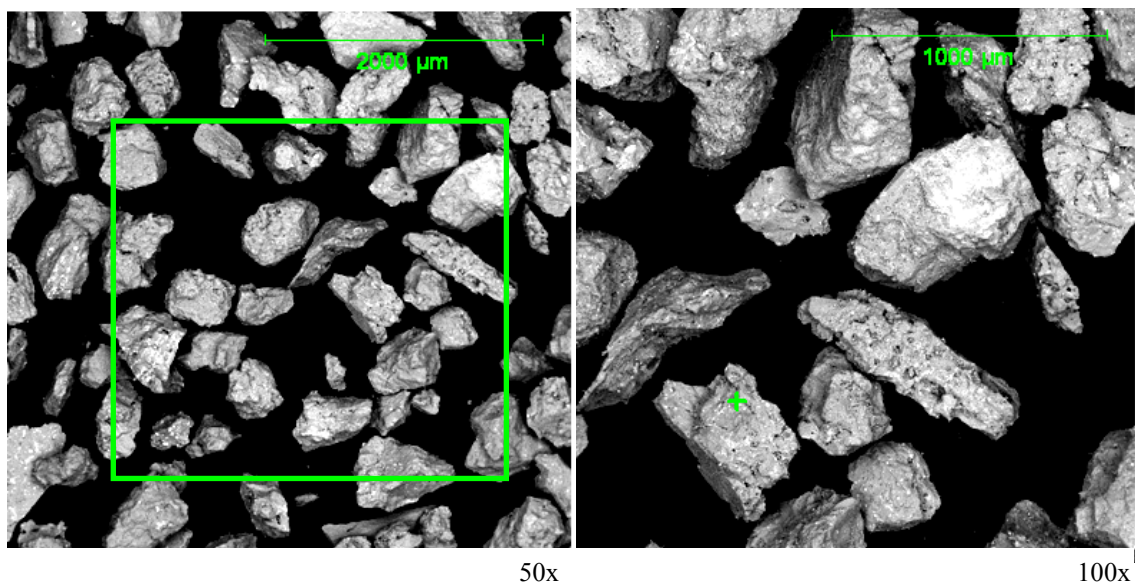
Zrna olivínu (*Obr. 32*) jsou izometrická s ostrými hranami. Povrch je hladký, bez prasklin. Ve zkoumaném vzorku se nacházely nečistoty, jejichž EDX analýza (bod B) je v přílohách (Příloha XI).



Obr. 33 Plošná EDX analýza olivínu

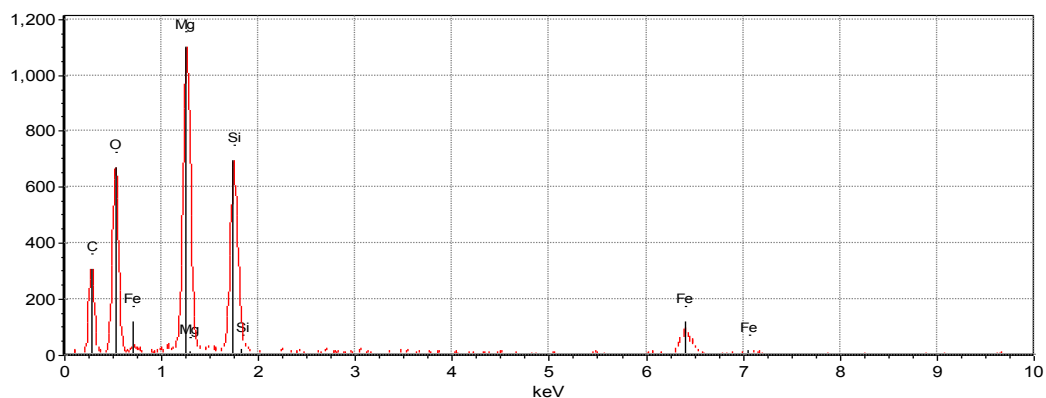


Obr. 34 Bodová EDX analýza olivínu

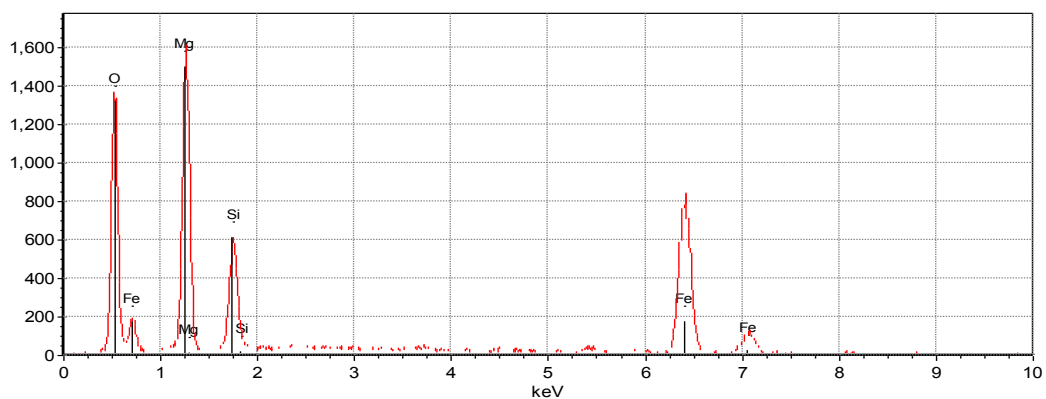


Obr. 35 Zrna dunitového ostrživa

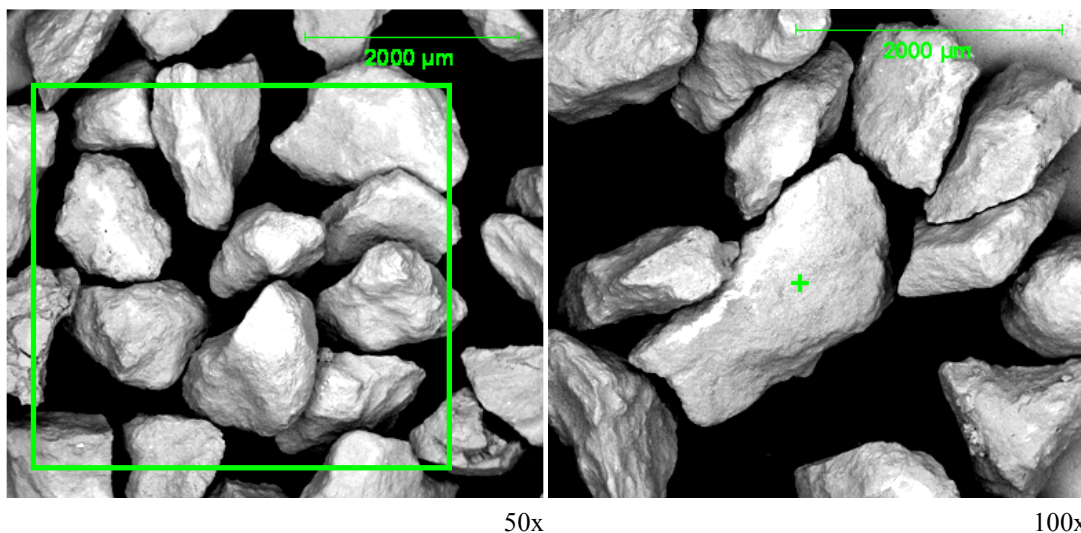
Zrna dunitu (*Obr. 35*) jsou protáhlá, ostrohranná. Povrch je drsný s patrnými prasklinami (porezitou). Výsledky EDX analýzy jsou znázorněny na *Obr. 36* a *37*.



Obr. 36 Plošná EDX analýza dunitu

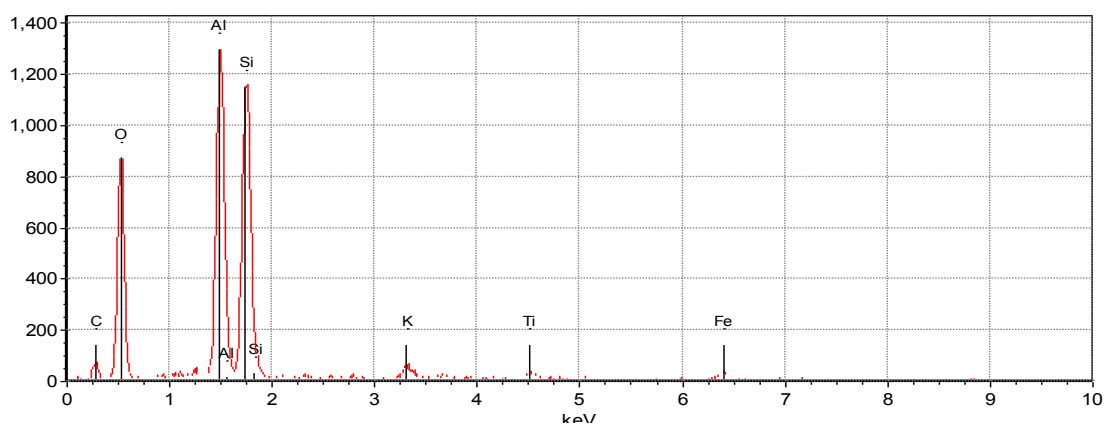


Obr. 37 Bodová EDX analýza dunitu

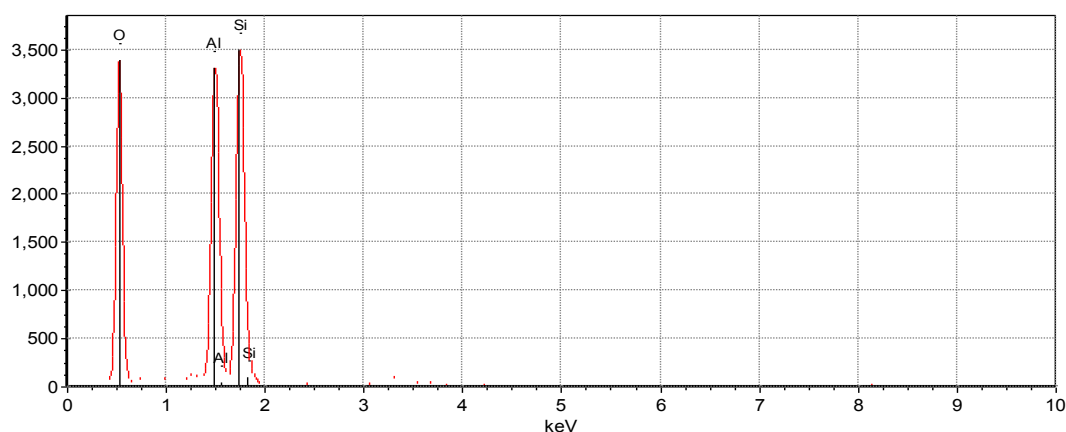


Obr. 38 Zrna šamotového lupku

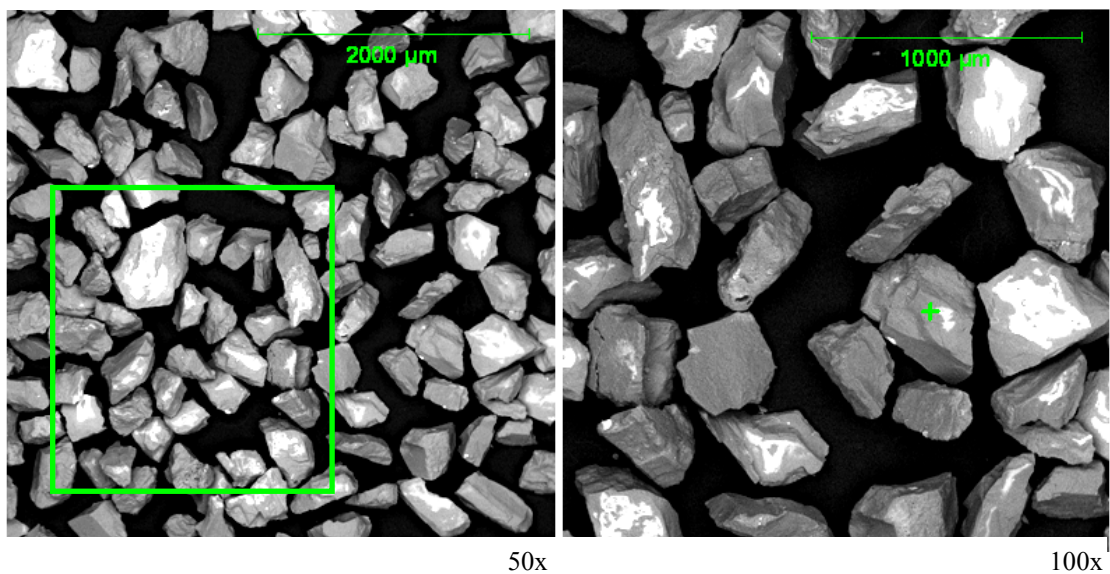
Zrna šamotového lupku (*Obr. 38*) jsou protáhlého charakteru s drsným povrchem. Hrany se mění od ostrých po mírně zaoblené.



Obr. 39 Plošná EDX analýza šamotového lupku

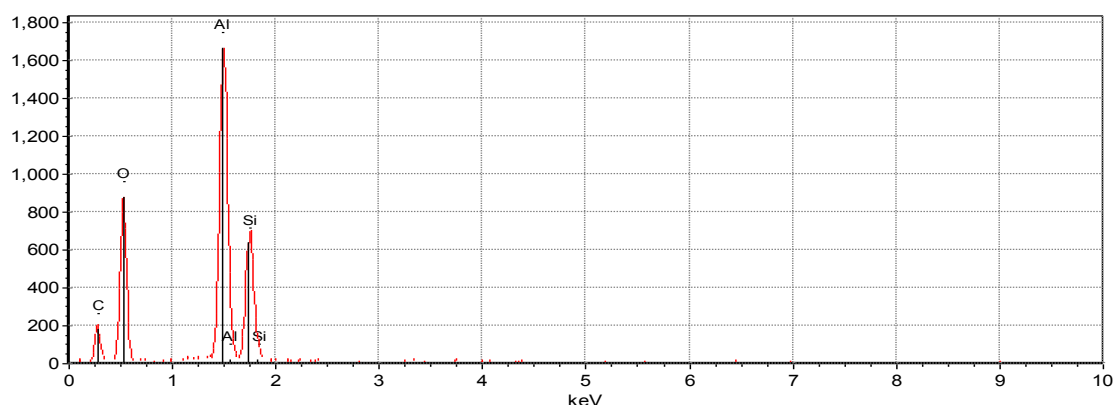


Obr. 40 Bodová EDX analýza šamotového lupku

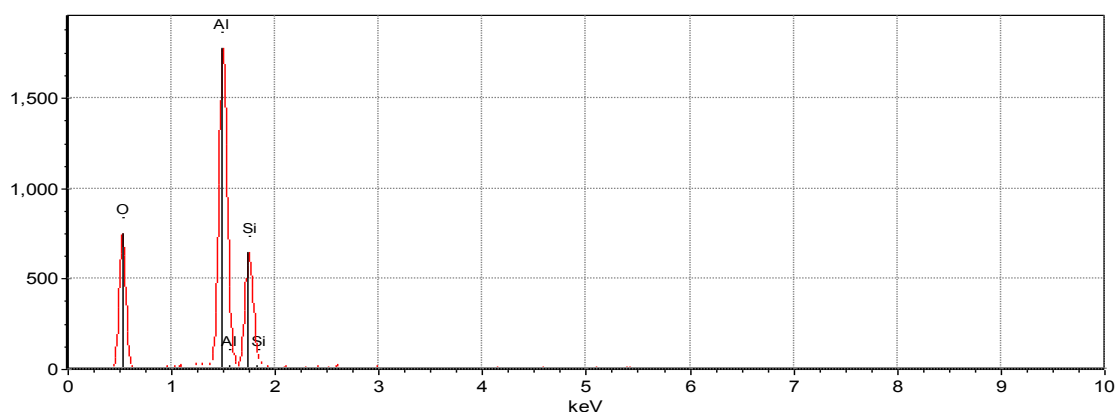


Obr. 41 Zrna Kerphalitu

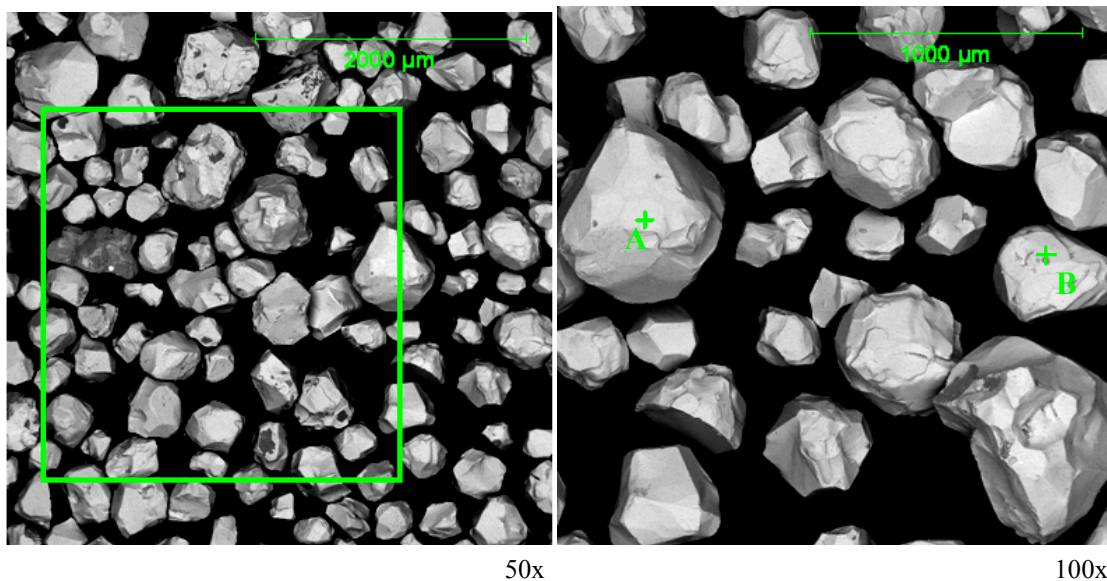
Zrna Kerphalitu (*Obr. 41*) jsou ostrohranná, protáhlého charakteru. Na povrchu jsou patrné lomové plochy po mechanickém zpracování ostřiva.



Obr. 42 Plošná EDX analýza Kerphalitu

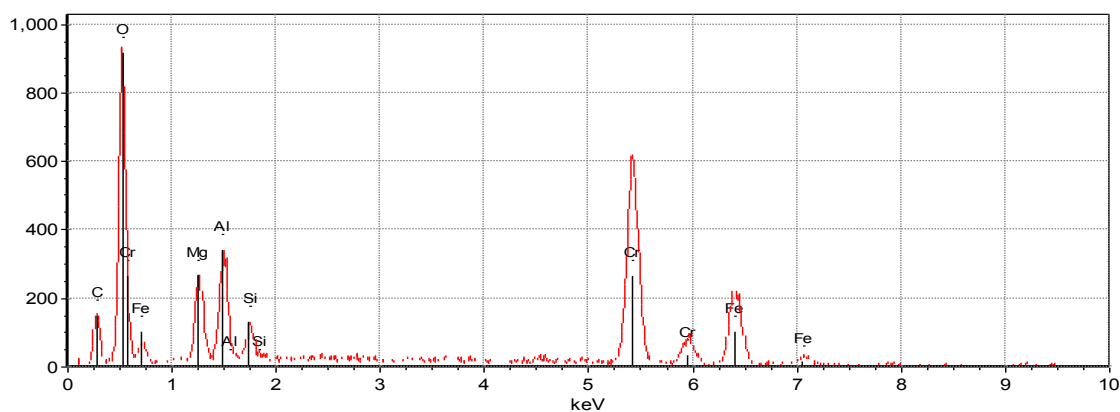


Obr. 43 Bodová EDX analýza Kerphalitu

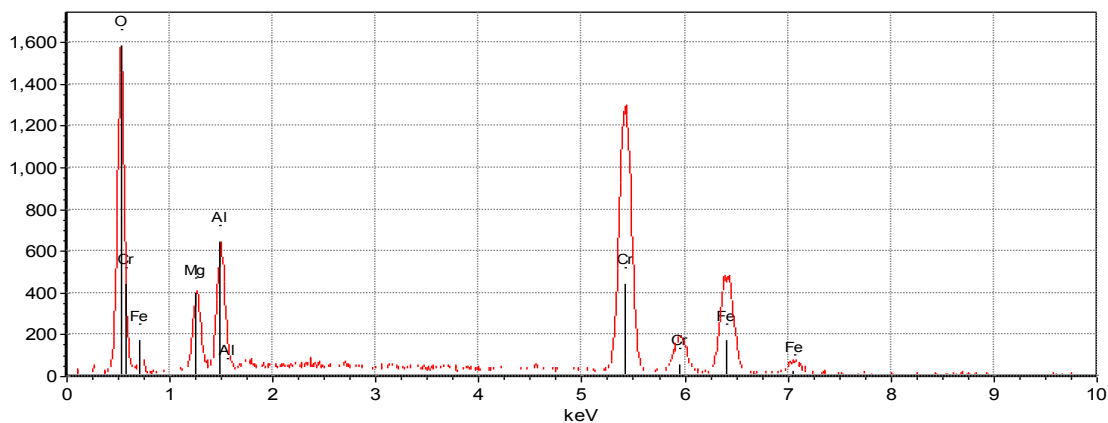


Obr. 44 Zrna chromitu

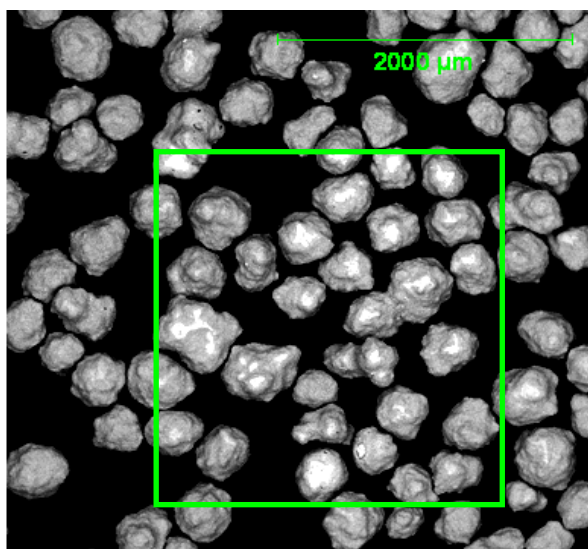
Zrna chromitu (*Obr. 44*) jsou izometrická s ostrohranným povrchem bez prasklin. Některá zrna ve vzorku byla znečištěna, bodová EDX analýza nečistot v bodě B je v přílohách (Příloha XI).



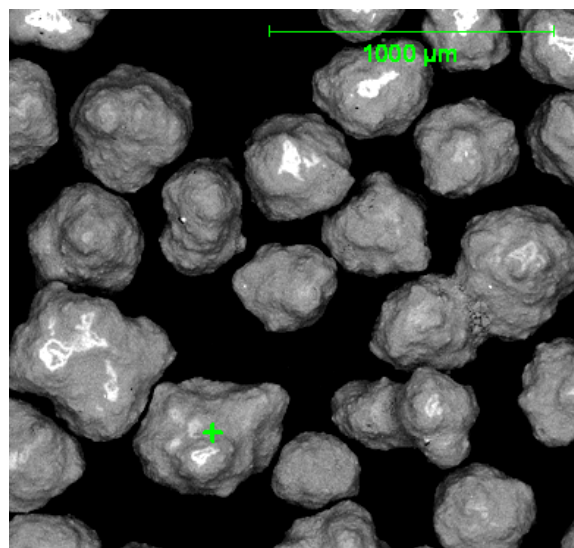
Obr. 45 Plošná EDX analýza chromitu



Obr. 46 Bodová EDX analýza chromitu v bodě A



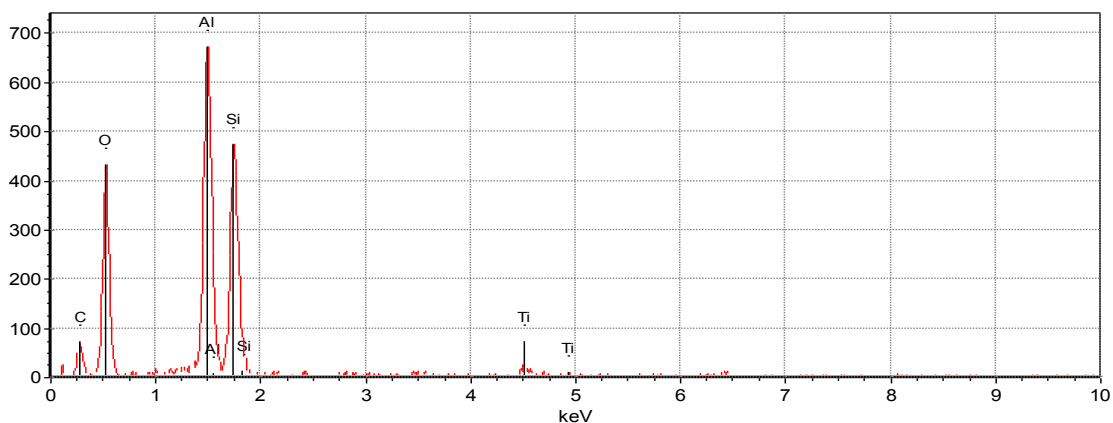
50x



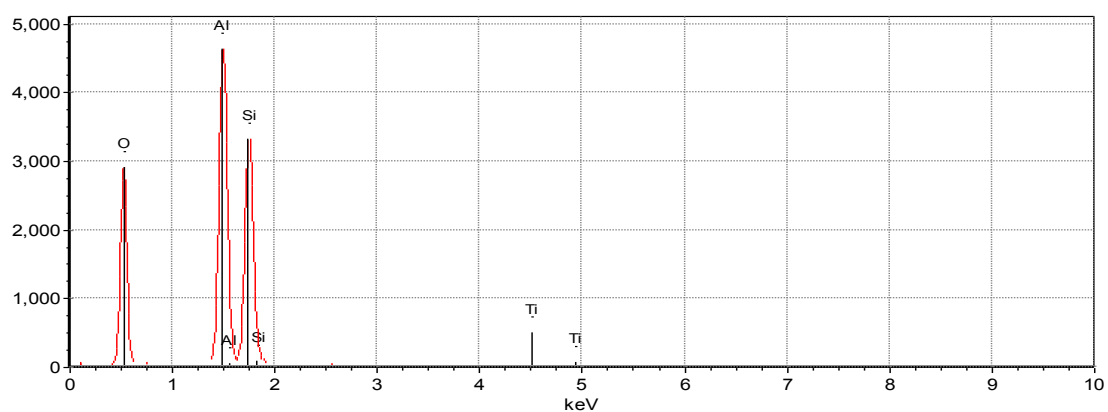
100x

Obr. 47 Zrna ostřiva Specialsand CKL 450

Ostřivo Specialsand (*Obr. 47*) má kulatá zrna s členitým drsným povrchem.



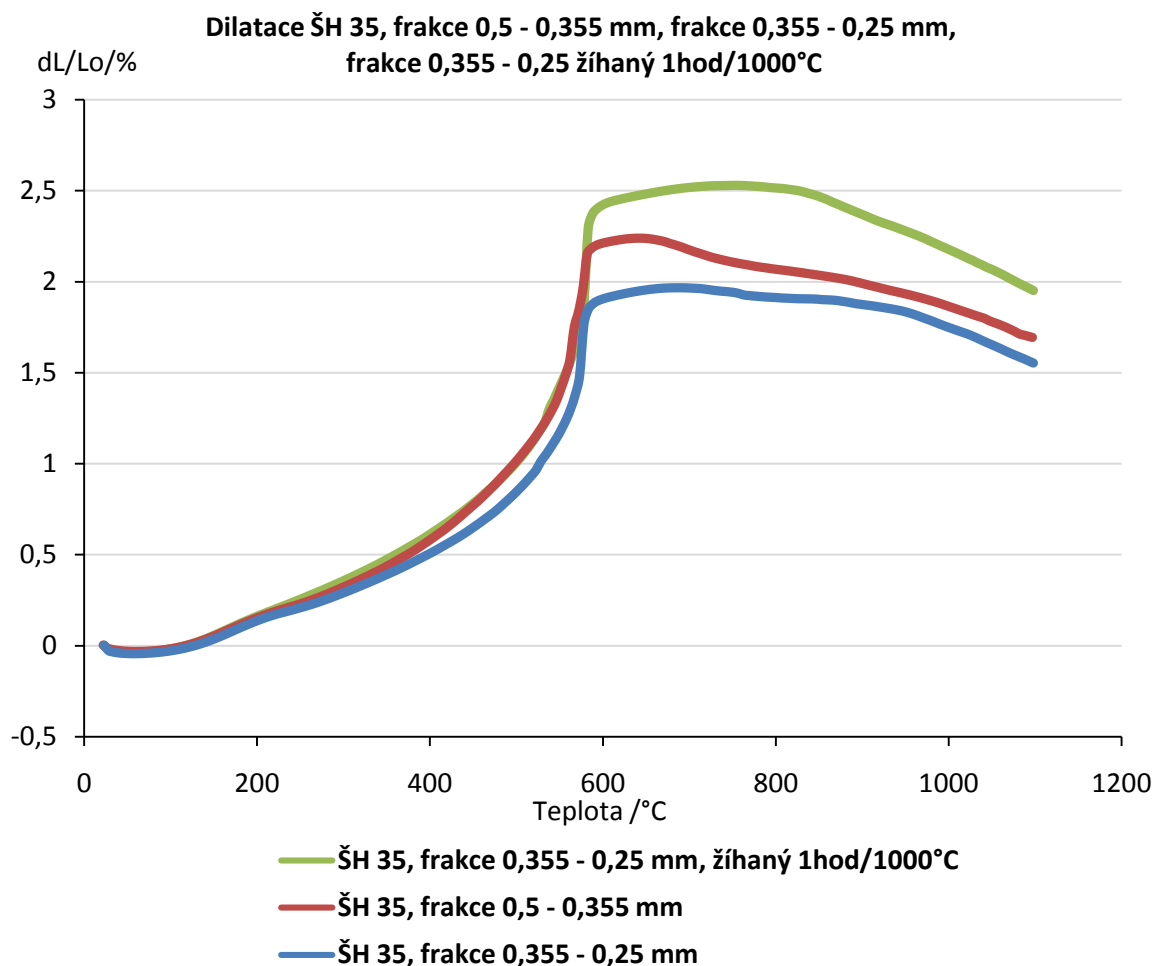
Obr. 48 Plošná EDX analýza ostřiva Specialsand CKL 450



Obr. 49 Bodová EDX analýza ostřiva Specialsand CKL 450

4.3.3. Hodnocení tepelné dilatace

Dilatometrická analýza standardu, ostřiva ŠH 35 byla provedena na frakcích 0,5 – 0,355 mm a 0,355 – 0,25. Cílem měření bylo potvrdit vliv velikosti frakce na míru dilatace. Pro aktivaci povrchu zrn byl jeden vzorek frakce 0,355 – 0,25 mm vyžíhán na 1000°C po dobu 1 hod. Výsledky měření jsou na *Obr. 50*.



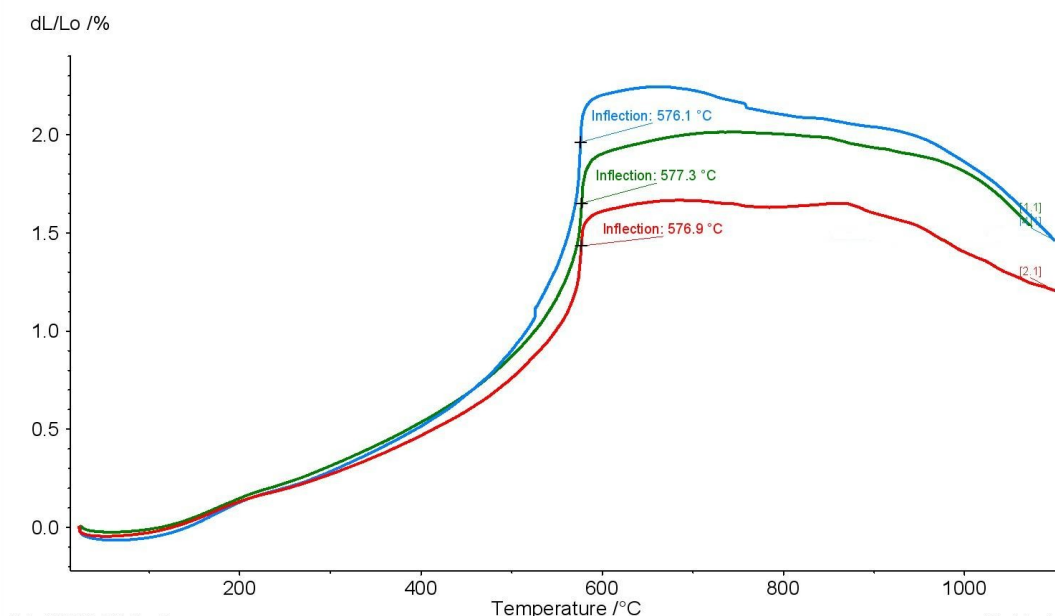
Obr. 50 Tepelná dilatace ostřiva ŠH 35

Rozdíly v dilataci jednotlivých frakcí potvrzují, že větší zrna, v tomto případě frakce 0,5 – 0,355 mm, mají vyšší dilataci (max. 2,35% při 600°C), než zrna menší - frakce 0,355 – 0,25 mm (max. 2% při 650°C). Toto zjištění dále poslouží k vytvoření hybridního ostřiva s nižší dilatací, kdy větší frakce křemenného ostřiva budou nahrazeny stejnými frakcemi ostřiva nekřemenného s lineárnějším průběhem dilatace (např. olivín, dunit, Kerphalit, šamotový lupek).

Dilatace žíhaného vzorku vzrostla (max. 2,5% při 790°C) oproti dilataci nežíhaného vzorku. Vystala zde otázka, zda žíháním nedošlo ke cristobalitické přeměně.

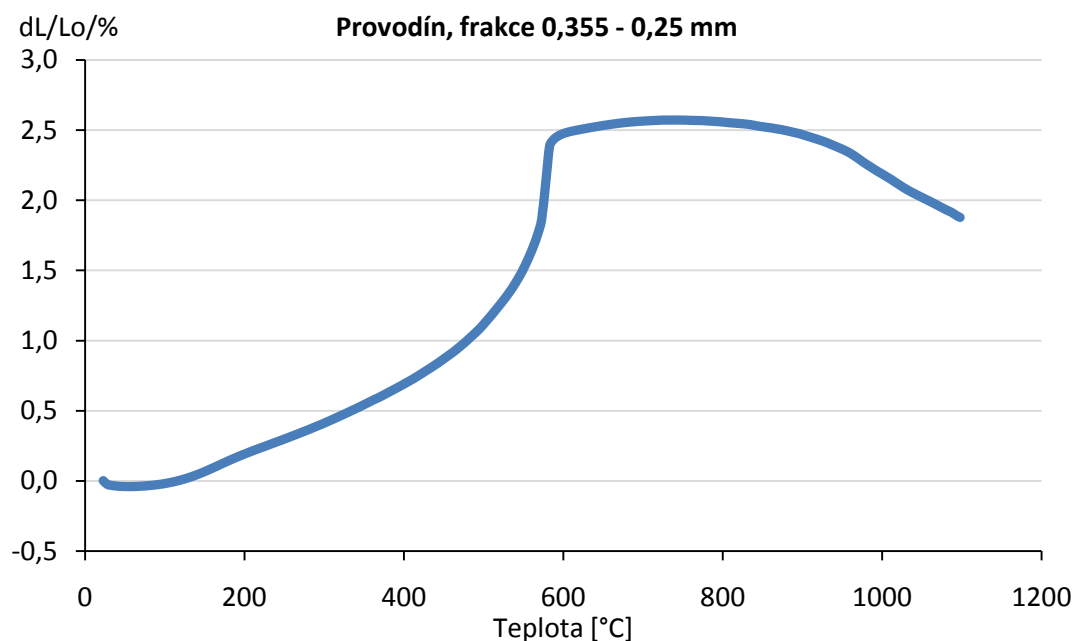
Vzorek byl proto podroben rentgenové difrakční analýze, která přeměnu popřela. Výsledek XRD analýzy je v přílohách (Příloha XII).

Na *Obr. 51* jsou patrné teploty fázové přeměny $\beta(\text{SiO}_2) \rightarrow \alpha(\text{SiO}_2)$. V průměru je tato teplota 576,7 °C .



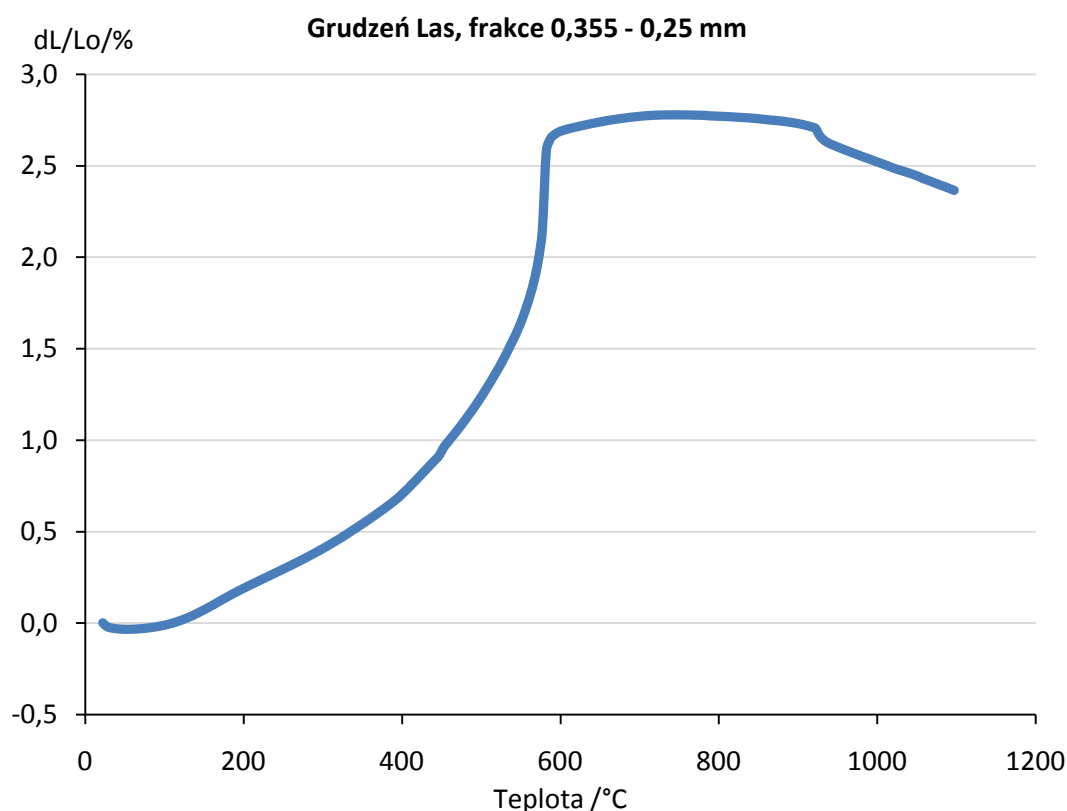
Obr. 51 Fázová přeměna ŠH 35, frakce 0,355 – 0,25 mm.

Měření dilatace ostřiva Provodín (*Obr. 52*) mělo, po porovnání hodnot dilatace se standardním ostřivem ŠH 35, potvrdit vliv tvaru zrn na dilataci.



Obr. 52 Graf dilatace ostřiva Provodín

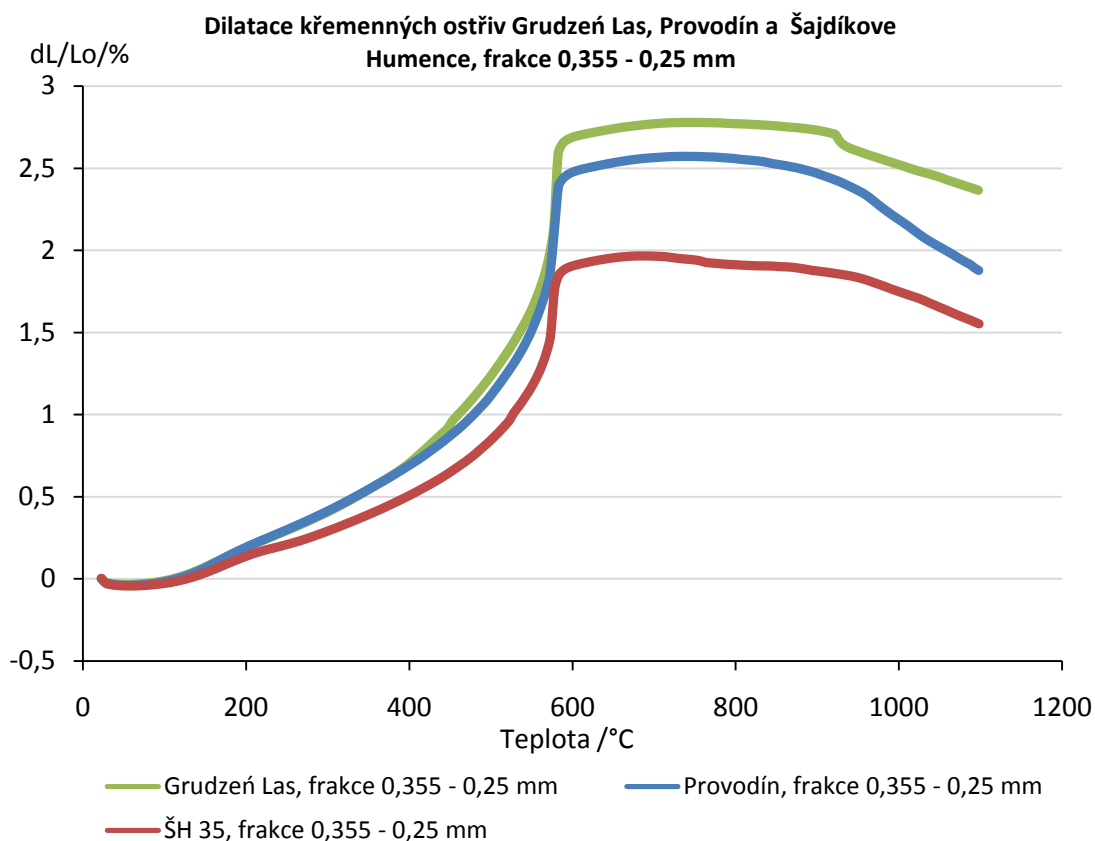
Naměřená hodnota dilatace ostřiva Provodín byla, i přes hranatý tvar zrn, vyšší (max. 2,6% při 700°C), než hodnota dilatace stejné frakce ostřiva ŠH 35 (2% při 650°C). Důvodem je obsah živců (podle Lichého [37] v zastoupení - orthoklasy $4,39 \pm 0,93\%$, plagioklasy a oligoklasy $2,42 \pm 0,66\%$) v ostřivu ŠH 35, které snižují míru dilatace (živce snižují teplotu tání SiO_2), z čehož vyplývá i významný vliv chemického složení (čistoty) na tepelnou dilataci. Na základě tohoto zjištění byla provedena dilatometrická analýza na polském křemenném ostřivu Grudzeń Las (*Obr. 53*), které má, stejně jako ŠH 35, zakulacená zrna.



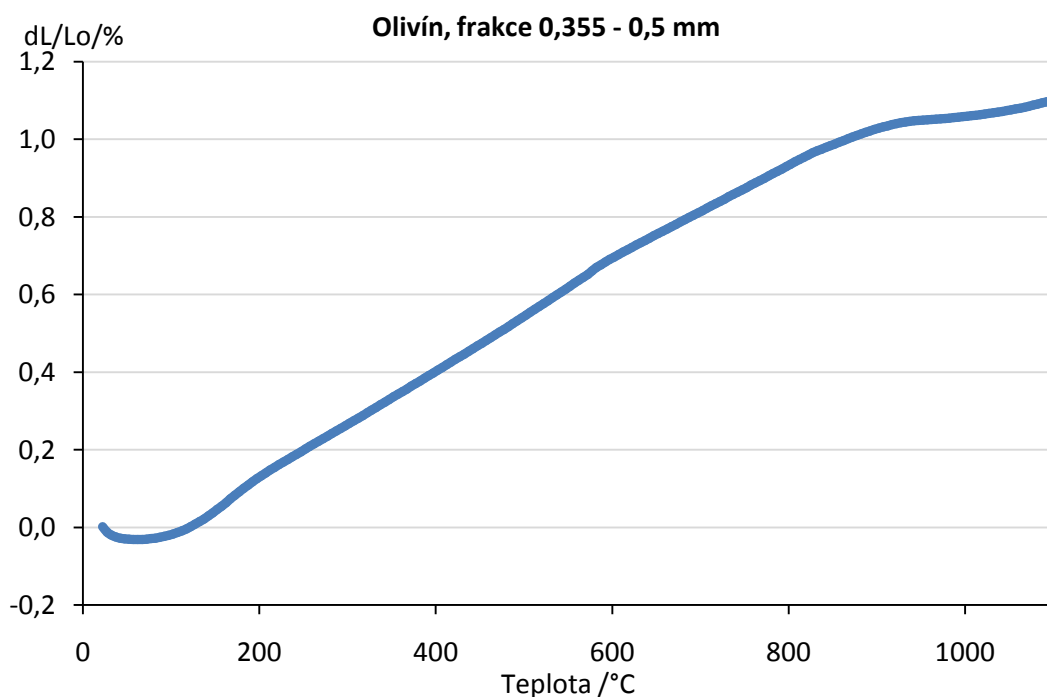
Obr. 53 Graf dilatace ostřiva Grudzeń Las

Dilatační křivka ostřiva Grudzeń Las (max. 2,8% při 780°C) je oproti křivce provodínského ostřiva (max. 2,6% při 780°C) posunuta k vyšším hodnotám. Naměřené hodnoty dokazují teorii, že ostřivo s hranatými zrny bude mít nižší tepelnou dilataci, než ostřivo se zrny kulatými.

Porovnání dilatačních křivek hodnocených křemenných ostřiv je na *Obr. 54*. U všech ostřiv byla hodnocena frakce 0,355 – 0,25 mm.

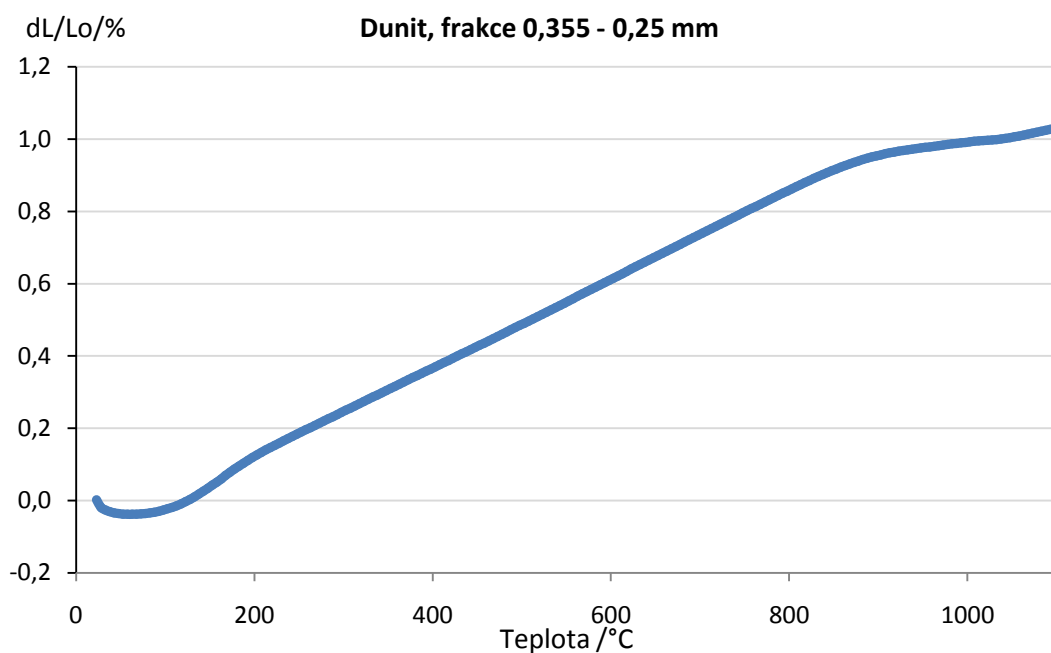


Obr. 54 Dilatační křivky ostřiv Grudzeň Las, Provodín a Šajdíkové Humence



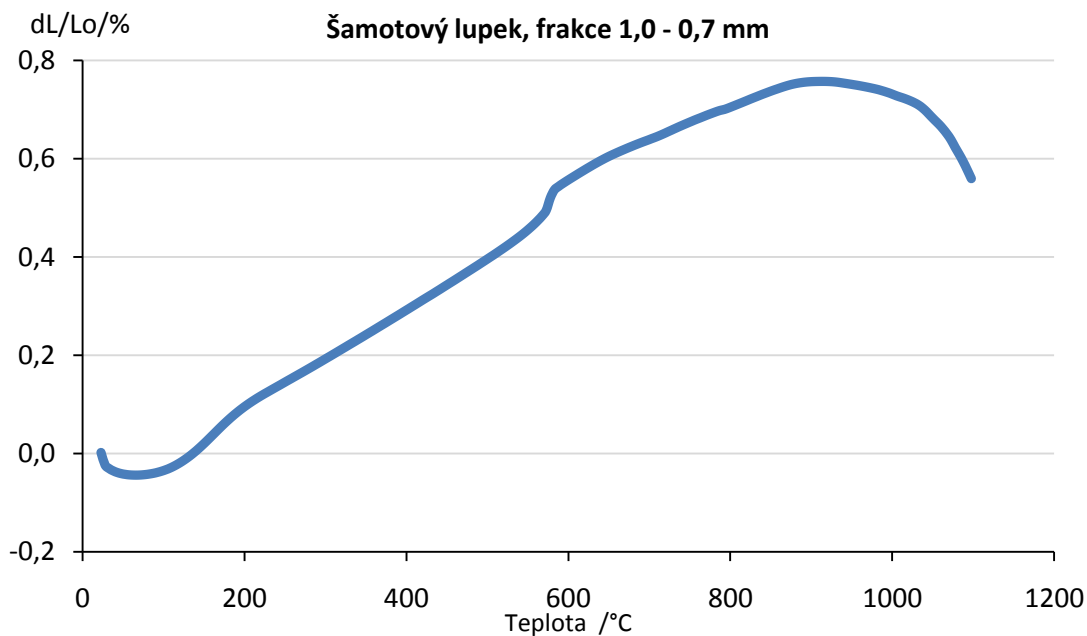
Obr. 55 Dilatační křivka olivínu

Dilatace olivínového ostřiva (*Obr. 55*) je lineární. Maximální naměřená hodnota dilatace je 1,1% při 1100°C.



Obr. 56 Dilatační křivka dunitu

Dilatační křivka dunitu (Obr. 56) je lineární a její maximální hodnota při 1100 °C je 1,03%.



Obr. 57 Dilatační křivka šamotového lupku

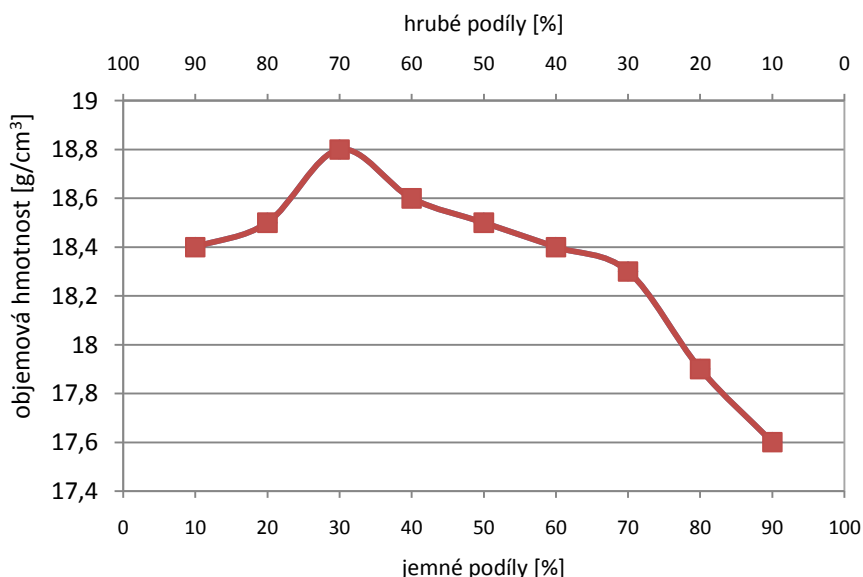
Dilatační křivka šamotového lupku (Obr. 57) je téměř lineární, maximum je 0,78% při teplotě 900°C, od této teploty prudce klesá. V literatuře [21] se udává, že hodnota dilatace je při 1400°C je -0,5%. U šamotového lupku byla měřena frakce 1,0 – 0,7 mm z důvodu absence frakce 0,355 – 0,25 mm.

4.3.4. Hybridní ostřiva

Hybridní ostřiva byla sestavena ze standardu ŠH 35 a olivínu nebo Specialsandu.

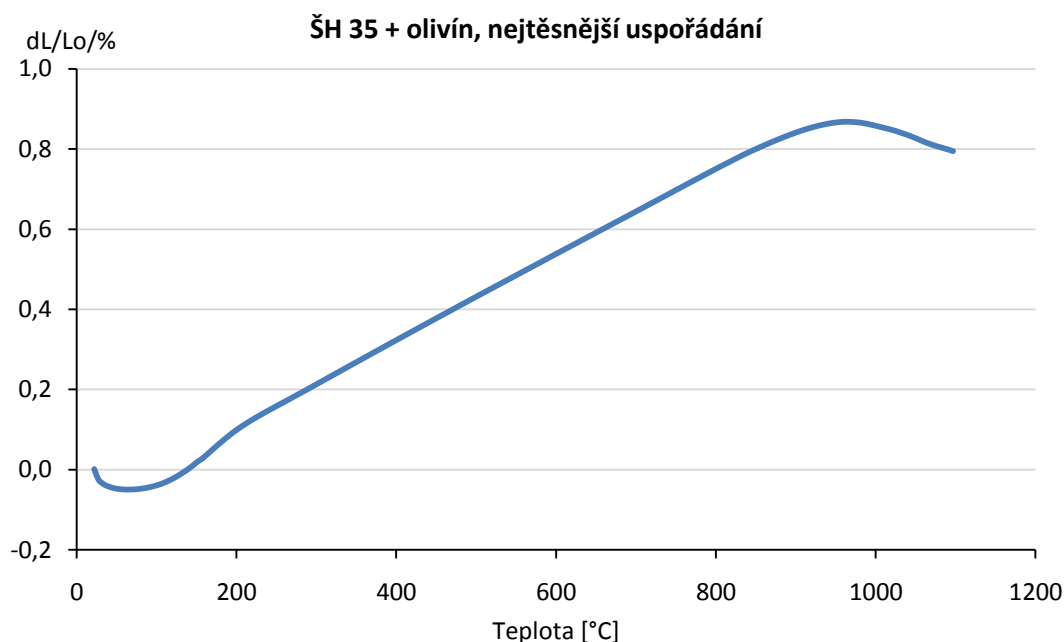
4.3.4.1. Hybrid ŠH 35 - olivín

Hybridní ostřivo bylo složeno ze standardu (ŠH 35) a olivínu, který vykazuje lineární průběh tepelné dilatace. Pro zjištění maximální možné hodnoty dilatace směsi bylo na základě sypných hmotností určeno nejtěsnější uspořádání frakce olivínu 0,5 – 0,355 mm (hrubé podíly) a frakcí ŠH 35 <0,355 mm (jemné podíly) (*Obr. 58*). Tyto frakce byly vybrány na základě sitového rozboru ŠH 35 (*Tab. 2*) a získaných závislostí z měření dilatace, které hovoří o tom, že větší zrna mají vyšší dilataci. Proto frakce 0,5 – 0,355 mm, která je v ostřivu ŠH 35 zastoupena podílem 32,2%, byla nahrazena stejnou frakcí olivínového ostřiva.



Obr. 58 Nejtěsnější uspořádání olivínu a ŠH 35

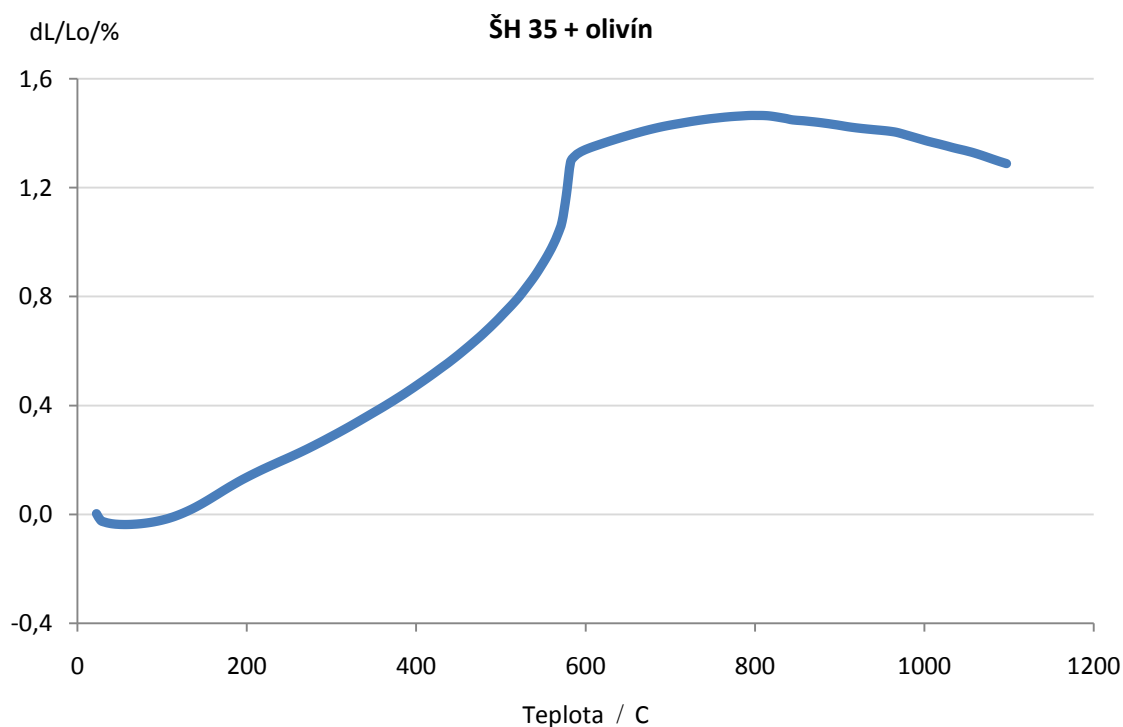
Nejvyšší objemová hmotnost ($18,8 \text{ g/cm}^3$) byla zjištěna při poměru 30% jemných podílů a 70% hrubých podílů.



Obr. 59 Dilatační křivka nejtěsnějšího uspořádání hybridního ostřiva ŠH 35 - olivín

Dilatační křivka nejtěsnějšího uspořádání hybridního ostřiva ŠH 35 – olivín (*Obr. 59*) má lineární průběh a maximum 0,89% při 980 °C.

Na základě granulometrického rozboru ŠH 35 bylo, kromě nejtěsnějšího uspořádání, sestaveno i hybridní ostřivo o dané granulometrii. Frakce 1,4 – 0,355 mm byly nahrazeny olivínem. Hmotnost frakcí zůstala zachována. Výsledná křivka dilatace takto vytvořeného systému je na *Obr. 60*. Maximální hodnota dilatace 1,5% je při 800 °C.

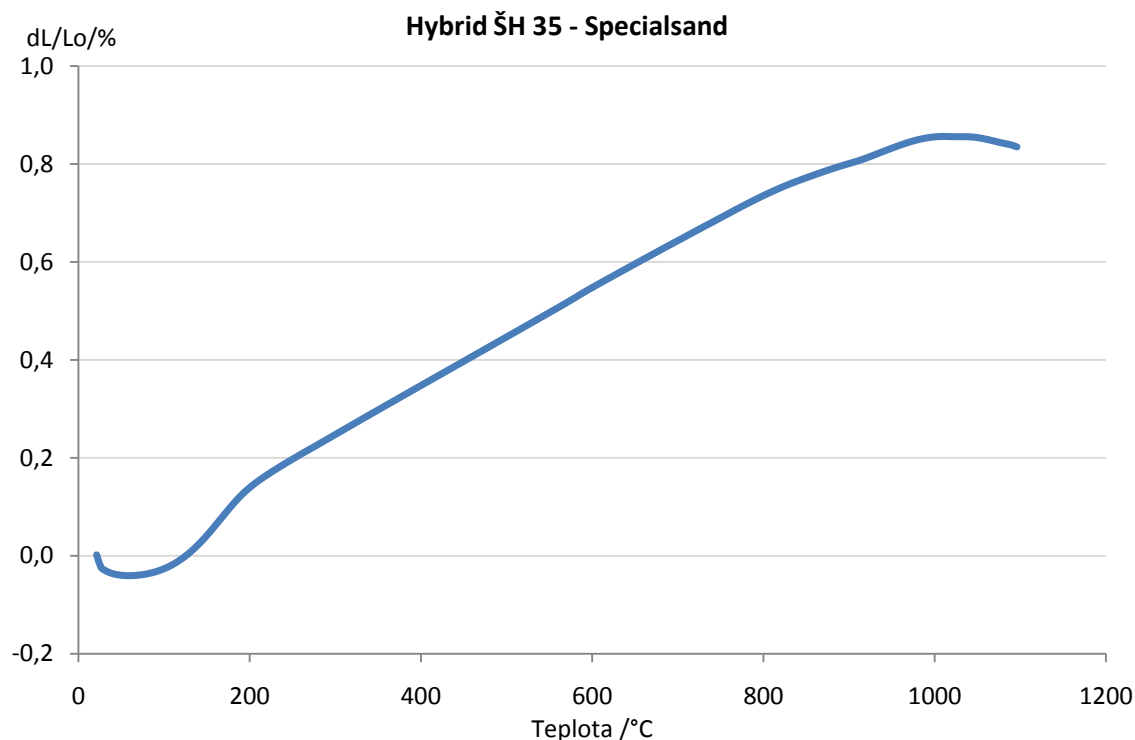


Obr. 60 Dilatační křivka hybridního ostřiva ŠH 35 - olivín.

Rozdílnost v průběhu obou dilatačních křivek hybridního systému lze vysvětlit vyšším zastoupením ŠH 35 ve vzorku (u nejtěsnějšího uspořádání 30%, zde 50,4%). Také je nutno vzít v úvahu „nevyzpytatelné“ chování disperzního materiálu. Křivka vykazuje fázovou přeměnu SiO_2 . Na Obr. 62 lze porovnat dilataci všech druhů měřených ostřiv. Hybridní ostřivo ŠH 35 – olivín zde zaujímá polohu mezi křivkami dilatace křemenných a nekřemenných ostřiv.

4.3.4.2. Hybrid ŠH 35 - Specialsand

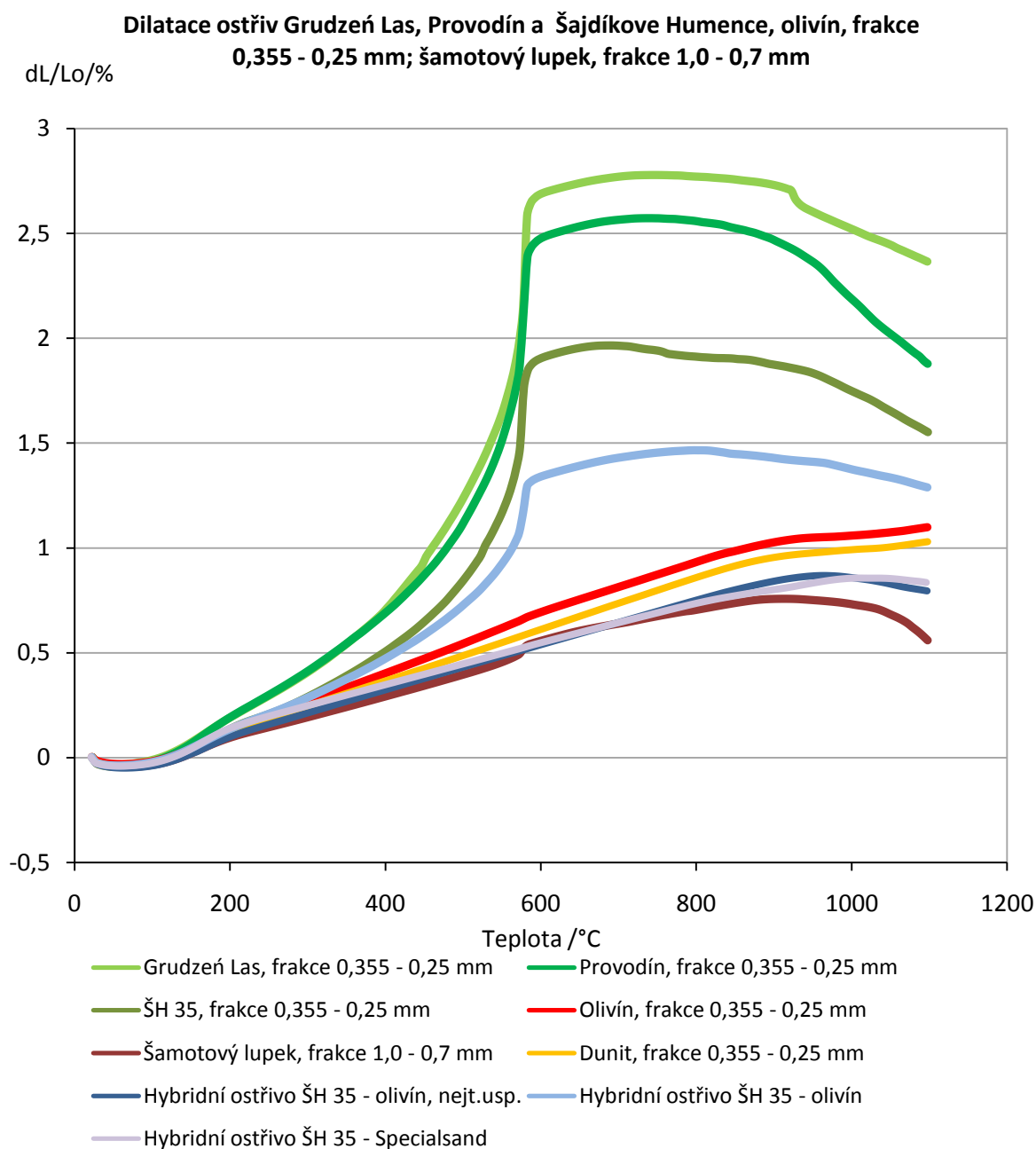
Podle síťového rozboru standardu ŠH 35 bylo sestaveno i další hybridní ostřivo, kde byly některé frakce, stejně jako u hybridu ŠH 35 – olivín, nahrazeny ostřivem Specialsand. Dilatační křivka (Obr. 61) je lineární, maximální hodnota dilatace je 0,85% při 1000 °C. Z důvodu nedostatečného množství ostřiva Specialsand nebylo u hybridního ostřiva sestaveno nejtěsnější uspořádání.



Obr. 61 Dilatace Hybridu ŠH 35 - Specialsand

4.3.5. Porovnání dilatace měřených ostřiv

Nejvyšší hodnotu tepelné dilatace vykazuje křemenné ostřivo Grudzeň Las (max. 2,8% při 780°C), naopak nejnižší tepelnou dilataci má šamotový lupek (max. 0,78% při teplotě 900°C). Křivky (Obr. 62) všech hodnocených křemenných ostřiv a hybridního ostřiva mají, diskontinuální charakter (při teplotě přibližně 578 °C dochází k přeměně $\beta(\text{SiO}_2) \rightarrow \alpha(\text{SiO}_2)$). Průběh dilatačních křivek nekřemenných ostřiv je lineární, stejně tak je tomu i u nejtěsnějšího uspořádání hybridního ostřiva ŠH 35 – olivín a hybridního ostřiva ŠH 35 – Specialsand.



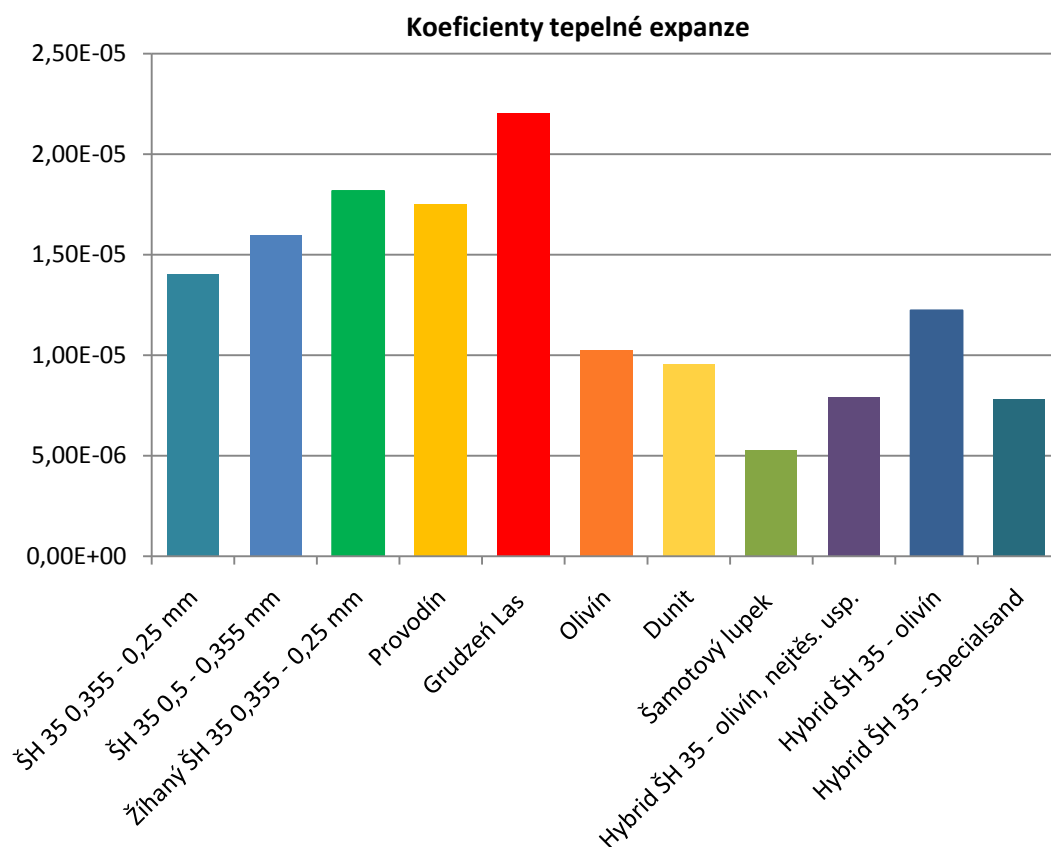
Obr. 62 Dilatační křivky měřených ostřiv

4.3.6. Koeficient tepelné expanze

Nejvyšší koeficient tepelné expanze (Tab. 5, Obr. 63) v rozmezí teplot 20 – 1100 °C má křemenné ostřívo Grudzeň Las ($2,20607 \cdot 10^{-5} \cdot \text{K}^{-1}$), naopak nejnižší koeficient tepelné expanze má Šamotový lupek ($5,2918 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$).

Tab. 5 Koeficienty tepelné expanze (20 – 1100 °C)

ŠH 35 0,355 – 0,25 mm	$1,40083 \cdot 10^{-5} \cdot \text{K}^{-1}$
ŠH 35 0,5 - 0,355 mm	$1,59529 \cdot 10^{-5} \cdot \text{K}^{-1}$
Žíhaný ŠH 35 0,355 – 0,25 mm	$1,81796 \cdot 10^{-5} \cdot \text{K}^{-1}$
Provodín	$1,75337 \cdot 10^{-5} \cdot \text{K}^{-1}$
Grudzeň Las	$2,20607 \cdot 10^{-5} \cdot \text{K}^{-1}$
Olivín	$1,02587 \cdot 10^{-5} \cdot \text{K}^{-1}$
Dunit	$9,53393 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$
Šamotový lupek	$5,2918 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$
Hybrid ŠH 35 – olivín, nejt. usp.	$7,89165 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$
Hybrid ŠH 35 – olivín	$1,22274 \cdot 10^{-5} \cdot \text{K}^{-1}$
Hybrid ŠH 35 - Specialsand	$7,79266 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$



Obr. 63 Koeficienty tepelné expanze

5. Diskuze dosažených výsledků

Z provedených analýz křemenných ostřiv je patrný rozdíl mezi jednotlivými ostřivy. Slovenské ostřivo Šajdíkové Humence má kulatá zrna, ale vysoký obsah živců. Přítomnost živců, snižujících tepelnou dilataci, znemožňovala ověření vlivu tvaru zrn na dilataci. Z těchto důvodů bylo hodnoceno i ostřivo polského původu Grudzeń Las, které má zaoblená izometrická zrna a vysokou chemickou čistotu. Hodnota dilatace výše zmíněných ostřiv byla porovnána s dilatací ostrohranného křemenného ostřiva Provodín. Potvrdil se tak vliv tvaru zrn na výslednou hodnotu dilatace a to tak, že kulatá zrna mají dilataci vyšší, než zrna hranatá (Grudzeń Las - max. 2,8% při 780 °C; Provodín max. 2,6% při 780 °C). Toto je dáno především rozdílem v uspořádání zrn.

Dalším kritériem, které má mít vliv na dilataci je velikost zrna. Předpokládalo se, že větší zrna budou mít také větší dilataci. Toto tvrzení bylo potvrzeno měřením dilatace frakcí 0,5 – 0,355 mm a 0,355 – 0,25 mm ostřiva Šajdíkové Humence, kdy dilatace větší frakce byla vyšší (0,5 – 0,355 mm - max. 2,35% při 600 °C; 0,355 – 0,25 mm - max. 2% při 650 °C).

Dále byla hodnocena dilatace ostřiv nekřemenných – olivínu, dunitu a šamotového lupku. Potvrdil se tak předpokládaný lineární charakter dilatace těchto ostřiv.

Na základě získaných výsledků bylo sestaveno hybridní ostřivo složené z olivínu nebo Specialsandu a křemenného ostřiva ŠH 35. Dilatační křivka nejtěsnějšího uspořádání ŠH 35 – olivín nevykazuje přeměnu ($\beta(\text{SiO}_2) \rightarrow \alpha(\text{SiO}_2)$) a celková hodnota dilatace je nižší (0,9% při 980 °C). Hybrid ŠH 35 – olivín sestavený podle síťového rozboru standardu vykazuje fázovou přeměnu SiO_2 , ovšem míra dilatace je nižší (max. 1,5% při 800 °C), než u samotného ostřiva ŠH 35 (>2%). Hybrid sestavený na stejném principu, jen za použití ostřiva Specialsand, má plynulou dilatační křivku s maximem 0,85% při 1000 °C. Uvedené systémy vyžadují další zkoumání, která jsou však nad rámec této diplomové práce.

Dilatační charakteristiky jsou doplněny hodnocením vlastností ostřiv, jako jsou: granulometrie, pH, ztráty žíháním, EDX analýzy a hodnocení tvaru zrn.

6. Závěr

V diplomové práci byl vytyčen cíl potvrdit vliv některých charakteristik ostřiv na jejich tepelnou dilataci a na základě získaných výsledků sestavit ostřivo s lineárnějším průběhem dilatace, než mají křemenná ostřiva. Předpokladem bylo, že tvar a velikost zrn má vliv na výslednou dilataci. Ostřiva, jejichž dilatometrickou analýzou se měla předchozí tvrzení ověřit, byla vybrána na základě empirie (Šajdíkové Humence mají kulatá zrna, ale nízkou chemickou čistotu, Grudzeń Las má izometrická zakulacená zrna a vysokou chemickou čistotu a Provodín má hranatá zrna). Měřením byl potvrzen vliv tvaru a velikosti zrn na dilataci a tím splněn jeden z vytyčených cílů.

Dalším cílem bylo na podkladě výše zmíněných poznatků sestavit hybridní ostřivo. Toto bylo složeno z křemenného ostřiva ŠH 35 a olivínu nebo Specialsandu na základě granulometrické skladby ŠH 35. Některé jeho frakce byly zastoupeny výše zmíněnými nekřemennými ostřivy. Dále bylo vytvořeno nejtěsnější uspořádání ostřiv ŠH 35 a olivínu, a změřena dilatace tohoto systému. Výsledkem byla lineární dilatační křivka, s celkově nižší hodnotou dilatace. Nejtěsnější uspořádání ŠH 35 – Specialsand nebylo, z nedostatečného množství ostřiva, sestaveno.

Diplomová práce by měla poskytnout přehled nekřemenných ostřiv používaných ve slévárenství a doplnit jej o hodnocení dilatace vybraných ostřiv. Dále by měla nastínit řešení problematiky s tepelnou dilatací, a to především zohledňováním tvaru a velikosti zrn použitého ostřiva.

7. Seznam použité literatury

- [1] JIRÁSEK, J., SIVEK, M., LÁZNIČKA, P.: *Ložiska nerostů*. Ostrava. Anagram. 2010. ISBN 978-80-7342-206-6. Dostupné z WWW: http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/loziska_cr.html.
- [2] SEIDL, H., DAHLMAN, M., IVANOV, S., KŘISTEK, J.: Syntetická slévárenská ostřiva přinášejí nové možnosti. *Slévárenství*, 2002, č. 5-6, s.181-184. ISSN 0037-6825.
- [3] TOMÁŠ, K.: Použití dunitového ostřiva pro výrobu odlitků. *Slévárenství*. 2000, 4, s. 197-203. ISSN 0037-6825.
- [4] JELÍNEK, P.: Nová metoda hodnocení granulometrické skladby ostřiv slévárenských formovacích směsí. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské v Ostravě. Řada hutnická*. 1973, 2, s. 167-190.
- [5] SLADEK, A; MEŠKO, J; DONIČIT, T.: *Beztrieskové technológie I*. Žilina : Edis, 2000. Dostupné z WWW: <http://fstroj.uniza.sk/web/kti/studium/BTN/kap4.pdf>.
- [6] JELÍNEK, P.: *Disperzní soustavy slévárenských formovacích směsí, ostřiva*. Ostrava, 2000. 138 s. ISBN 80-238-6118-2.
- [7] TILCH, W, et al.: Einfluss alternativer Formgrundstoffe auf die Eigenschaften von Formstoffund Gussteil. *Giesserei*. 2006, 8, s. 12-24. ISSN 0175-1034.
- [8] RUSÍN, K. a kol.: *Slévárenské formovací materiály*. Praha. SNTL. 1991. 392s. ISBN 80-03-00278-8.
- [9] *Pleinfelder Quarzsand* [online]. 2008 [cit. 2011-02-23]. Grundsteinunseres Erfolges. Dostupné z WWW: <http://www.pleinfelder-quarzsand.de/unternehmen.html>.
- [10] ODLOŽIL, J.: *Slévárenské písky a jejich vlastnosti*. Brno, 2008. 44 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [11] *FORMSERVIS* [online]. 2008 [cit. 2011-02-11]. Olivín. Dostupné z WWW: <http://www.formservis.cz/?p=olivin>.
- [12] CUPÁK, P; TOMÁŠ, K. Zkušenosti s nekřemennými ostřivy ve slévárně oceli ŠMERAL Brno, a.s. *Slévárenství*. 2006, 6, s. 222-226. ISSN 0037-6825.
- [13] ROTTER, L. Ověření olivínového písku při výrobě odlitků z 12% austenitických manganových ocelí: In *Nové poznatky o slévárenských ostřivech a jejich využití k zhospodárnění výroby odlitků*. Praha : ČVTS - SPOLEČNOST SLÉVÁRENSKÁ, 1972.
- [14] *Asbury Carbons* [online]. 2011 [cit. 2011-02-11]. Sand. Dostupné z WWW: <http://www.asbury.com/Sand.html>.
- [15] SMOLKOVÁ, M. Nové trendy vo využívání ostrív při výrobe odliatkov z oteruvzdorných materiálů. *Acta Metallurgica Slovaca*. 1997, 3, s. 196-202.
- [16] *FORMSERVIS* [online]. 2008 [cit. 2011-02-23]. Chromit. Dostupné z WWW: <http://www.formservis.cz/?p=chromit>.

- [17] GOLOTENKOV, O.N.: *Formovočnyye materialy : Učebnoe posobie*. Penza: Izdatelstvo Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2004. 167 s. Dostupné z WWW: <http://window.edu.ru/window_catalog/pdf2txt?p_id=14059>.
- [18] TELEGRAPH-JOURNAL [online]. 27.12.2010 [cit. 2011-02-23]. Recycling technology retrieves valuable resources. Dostupné z WWW: <<http://telegraphjournal.canadaeast.com/gallery/1365078,654997>>.
- [19] DuPont [online]. 2011 [cit. 2011-02-11]. Florida Zircon Sands. Dostupné z WWW: <http://www2.dupont.com/Titanium_Technologies/en_US/products/zircon_sands/index.html>.
- [20] JELÍNEK, P, et al. Nový druh bazického ostřiva, sintermagnezit „JEGENIT“. *Slévárenství*. 2007, 11-12, s. 540-545. ISSN 0037-6825.
- [21] CUPÁK, P; TOMÁŠ, K. Využití záporné tepelné dilatace lupkového ostřiva ke snížení zbytkových pevností formovacích směsí s vodním sklem. *Slévárenství*. 2006, 12, s. 462-464. ISSN 0037-6825.
- [22] Kuhmichel [online]. 2011 [cit. 2011-02-23]. White Fused Alumina – EK. Dostupné z WWW: <<http://www.kuhmichel.com/44-1-White-Fused-Alumina.html>>.
- [23] U.S. Patent Application No. 298,303, Unpublished (fillingdate Jan. 14, 1975) (Thomas Edward Garnar,Jr, applicant) Dostupné z WWW: <<http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO2&Sect2=HITOFF&p=1&u=%2Fnetachtml%2FPTO%2Fsearchadv.htm&r=1&f=G&l=50&d=PALL&S1=%28%22Synthetic+mineral+sand%22+AND+%22sand+produced+stauroilite%22%29&OS=>>>.
- [24] AWB [online]. 2010 [cit. 2011-02-23]. Min Sand – Mehr als nur ein neuer synthetischer Kernsand!. Dostupné z WWW: <http://www.awb-online.com/artikel/giesserei_erfahrungsaustausch_6-2004_de.htm>.
- [25] DAHLMANN, M; RECKNAGEL, U. Spezialsande. *Giesserei*. 2007, 6, s. 190-197. Dostupný také z WWW: <<http://www.huttenes-albertus.com/Artikel-und-Fachvortraege.787.0.html>>. ISSN 0175-1034.
- [26] ITOCHU CERATECH CORP. [online]. 2008 [cit. 2011-02-11]. CERABEADS. Dostupné z WWW: <<http://www.itc-cera.co.jp/English/index.html>>.
- [27] IFME [online]. 2010 [cit. 2011-02-11]. Andalusite. Dostupné z WWW: <<http://www.ifme.eu/scopi/group/foundry/foundry.nsf/pagesref/SBDD-7MDBPJ?OpenDocument&Lang=en>>.
- [28] DAHLMAN, M., RECKNAGEL,U., IVANOV, S., LUBOJACKÝ, M.: Speciální písky Huttenes-Albertus pro výrobu slévárenských forem a jader. *Slévárenství*, 2006. č. 10 - 11, s. 416-417. ISSN 0037-6825.
- [29] ILARDUYA [online]. 2010 [cit. 2011-02-11]. Specialsands. Dostupné z WWW: <<http://www.ilarduya.com/en/arenas.htm#a5>>.
- [30] SPADA, A.: Manufactured Alternatives to Traditional Molding Media. *Modern Casting*, 1998. č. 4, s.45-48. ISSN 0026-7562.

- [31] ELBEL, T, et al.: *Vady odlitků ze slitin železa. Klasifikace příčiny a prevence*. Brno: MATECS, 1992. 333s.
- [32] International Atlas of Casting Defects. Illinois : American Foundrymen's Society, 1993. ISBN 0-87433-053-X.
- [33] PAULÍČEK, R.: Hodnotenie sklonu formovacích zmesí k tvorbe záľupov odlievacou skúškou. *Slévárenství*, 1969. č. 6. s.268-269.
- [34] LEWANDOWSKI, J. *Materiały formierskie*. Kraków : AGH, 1997. 178 s.
- [35] *CRAIN'S PETROPHYSICAL HANDBOOK* [online]. 2002 [cit. 2011-02-23]. WETTABILITY. Dostupné z WWW: <<http://www.spec2000.net/09-wettability.htm>>.
- [36] IVANOV, S, et al. Lineární teplotní roztažnost různých typů jádrových směsí. *Slévárenství*. 2003, 6, s. 211-213.
- [37] LICHÝ, P. *Oolitizace křemenných zrn ostriv a její důsledky na kvalitu jednotné bentonitové směsi*. Ostrava, 2005. 98 s. Dizertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [38] *KERKOSAND spol. s r.o.* [online]. 2010 [cit. 2011-03-31]. Naše výrobky. Dostupné z WWW: <<http://www.kerkosand.sk/index1.htm>>.
- [39] *Grudzeń Las* [online]. 2010 [cit. 2011-03-31]. O nas - Historia. Dostupné z WWW: <<http://www.grudzenlas.pl/>>.
- [40] STRAKOŠOVÁ, P. *Interakce ostrivo - pojivo u fenolického uretanového systému (PUR COLD BOX)*. Ostrava, 2006. 81 s. Dizertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [41] *PROVODÍNSKÉ PÍSKY A.S.* [online]. 2010 [cit. 2011-03-31]. Geologie. Dostupné z WWW: <<http://www.pisky.cz/index1.htm>>.
- [42] Zkoušení formovacích a jádrových směsí: Metody a postupy. In *Sborník pro pracovníky pískových laboratoří*. Brno: Formservis, spol. s r.o. 2006. 123s.
- [43] MIKŠOVSKÝ, F.: Ústní sdělení (akademický pracovník VŠB – TU Ostrava, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava – Poruba) dne 31.3. 2011.
- [44] NETZSCH [online]. 2010 [cit. 2011-03-11]. DIL 402 C – product brochure. Dostupné z WWW: <<http://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products/detail/pid,16,t,6.html>>.

8. Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1 Zrna křemenného ostříva [9].....	8
Obr. 2 Modifikační změny SiO ₂ [8].....	9
Obr. 3 Dilatace a fázové přeměny SiO ₂ [6].....	10
Obr. 4 Olivínové ostřívo	11
Obr. 5 Dunitové ostřívo.....	12
Obr. 6 Chromitové ostřívo	13
Obr. 7 Zirkonové ostřívo [18]	14
Obr. 8 Zrna slinku TS KG 90 [20]	15
Obr. 9 Zrna šamotového lupku.....	16
Obr. 10 Zrna korundu [22]	17
Obr. 11 Cerabeads [24]	18
Obr. 12 Kerphalite KF [25]	19
Obr. 13 Bauxit-sand [25].....	19
Obr. 14 Zálupy [31].....	21
Obr. 15 Tvorba zálupů v různých místech formy [32].....	21
Obr. 16 Schéma vzniku zálupů [8].....	22
Obr. 17 Výronky [31].....	23
Obr. 18 Tvar zrn [35]	24
Obr. 19 Stavba ideální směsi, a) K = 6, b) K = 8, c) K = 12	25
Obr. 20 Dilatace jednotlivých druhů ostřiv [2] [3]	28
Obr. 21 Dilatační křivky staurolitu, zirkonu a křemenného ostříva [23]	29
Obr. 22 Součtová křivka ostříva ŠH 35	35
Obr. 23 Zrna křemenného ostříva ŠH 35	37
Obr. 24 Plošná EDX analýza ostříva ŠH 35	38
Obr. 25 EDX analýza v bodě A, ostřívo ŠH 35	38
Obr. 26 Zrna křemenného ostříva Provodín.....	39
Obr. 27 Plošná EDX analýza ostříva Provodín	39
Obr. 28 Bodová EDX analýza ostříva Provodín	39
Obr. 29 Zrna ostříva Grudzeň Las.....	40
Obr. 30 Plošná EDX analýza ostříva Grudzeň Las	40
Obr. 31 Bodová EDX analýza ostříva Grudzeň Las	40
Obr. 32 Zrna olivínového ostříva	41
Obr. 33 Plošná EDX analýza olivínu	41
Obr. 34 Bodová EDX analýza olivínu	41
Obr. 35 Zrna dunitového ostříva	42
Obr. 36 Plošná EDX analýza dunitu	42
Obr. 37 Bodová EDX analýza dunitu	42
Obr. 39 Plošná EDX analýza šamotového lupku	43
Obr. 40 Bodová EDX analýza šamotového lupku	43
Obr. 38 Zrna šamotového lupku.....	43
Obr. 41 Zrna Kerphalitu	44
Obr. 42 Plošná EDX analýza Kerphalitu	44
Obr. 43 Bodová EDX analýza Kerphalitu.....	44
Obr. 44 Zrna chromitu.....	45
Obr. 45 Plošná EDX analýza chromitu	45
Obr. 46 Bodová EDX analýza chromitu v bodě A.....	45
Obr. 48 Plošná EDX analýza ostříva Specialsand CKL 450	46
Obr. 47 Zrna ostříva Specialsandu CKL 450	46

Obr. 49 Bodová EDX analýza ostřiva Specialsand CKL 450.....	46
Obr. 50 Tepelná dilatace ostřiva ŠH 35	47
Obr. 51 Fázová přeměna ŠH 35, frakce 0,355 – 0,25 mm.....	48
Obr. 52 Graf dilatace ostřiva Provodín	48
Obr. 53 Graf dilatace ostřiva Grudzeň Las	49
Obr. 54 Dilatační křivky ostřiv Grudzeň Las, Provodín a Šajdíkové Humence	50
Obr. 55 Dilatační křivka olivínu	50
Obr. 56 Dilatační křivka dunitu	51
Obr. 57 Dilatační křivka šamotového lupku	51
Obr. 58 Nejtěsnější uspořádání olivínu a ŠH 35	52
Obr. 59 Dilatační křivka nejtěsnějšího uspořádání hybridního ostřiva ŠH 35 - olivín	53
Obr. 60 Dilatační křivka hybridního ostřiva ŠH 35 - olivín.	53
Obr. 61 Dilatace Hybridu ŠH 35 - Specialsand	54
Obr. 62 Dilatační křivky měřených ostřiv	55
Obr. 63 Koeficienty tepelné expanze	56
Tab. 1 Výsledky granulometrické a chemické analýzy.....	34
Tab. 2 Granulometrická skladba ostřiva ŠH 35	35
Tab. 3 Hodnoty získané ze síťového rozboru	36
Tab. 4 Chemické složení získané EDX analýzou (hodnoty v hmotnostních procentech)	37
Tab. 5 Koeficienty tepelné expanze (20 – 1100 °C)	56

9. Seznam příloh

- Příloha I Granulometrický rozbor ŠH 35
- Příloha II Granulometrický rozbor Provodínu
- Příloha III Granulometrický rozbor Grudzeň Lasu
- Příloha IV Granulometrický rozbor olivínu
- Příloha V Granulometrický rozbor dunitu
- Příloha VI Granulometrický rozbor šamotového lupku
- Příloha VII Granulometrický rozbor Kerphalitu
- Příloha VIII Granulometrický rozbor chromitu
- Příloha IX Granulometrický rozbor Specialsandu
- Příloha X Souhrn výsledků granulometrických rozborů
- Příloha XI EDX analýzy nečistot ostřiva ŠH 35, olivínu a chromitu
- Příloha XII Rentgenová difrakční analýza žíhaného vzorku ŠH 35
- Příloha XIII Kulatost ŠH 35
- Příloha XIV Kulatost Provodínu
- Příloha XV Kulatost Grudzeň Lasu
- Příloha XVI Kulatost olivínu
- Příloha XVII Kulatost dunitu
- Příloha XVIII Kulatost šamotového lupku
- Příloha XIX Kulatost Kerphalitu
- Příloha XX Kulatost chromitu
- Příloha XXI Kulatost Specialsandu
- Příloha XXII Dilatace ŠH 35, frakce 0,355 – 0,25mm a 0,5 – 0,355mm
- Příloha XXIII Dilatace ŠH 35, frakce 0,355 - 0,25 žíhaný 1000°C/1hod.
- Příloha XXIV Dilatace Provodínu a Grudzeň Lasu
- Příloha XXV Dilatace olivínu a dunitu
- Příloha XXVI Dilatace šamotového lupku
- Příloha XXVII Dilatace hybridního ostřiva ŠH 35 + olivín
- Příloha XXVIII Dilatace Hybridního ostřiva ŠH 35 - Specialsand